

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennustekniikka

Rakennesuunnittelu

Lauri Pellinen

ILMAVUODON VAIKUTUS VAIPPARAKENTEIDEN LÄMPÖ- JA KOSTEUSOLOSUHTEISIIN

Opinnäytetyö 2011

TIIVISTELMÄ

Lauri Pellinen

Ilmavuodon vaikutus vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteisiin, 73 sivua

Saimaan ammattikorkeakoulu, Lappeenranta

Tekniikka, Rakennustekniikka

Rakennesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö, 2011

Ohjaajat: Lehtori (DI) Timo Lehtoviita, (DI) Magnus Stagnäs, Finnmap Consulting Oy

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia yksittäisten ilmavuotojen vaikutuksia vaipparakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Tutkittaviksi seinärakenteiksi valittiin kevytrakenteinen termorankaseinä sekä betonielementtiseinä. Ilmavuodot mallinnettiin Comsol Multiphysics 4.1 -ohjelmistolla, joka on elementtimenetelmään perustuva monifysikaalinen simulointi- ja mallinnusohjelma. Työn tilaajana toimi Finnmap Consulting Oy.

Simulointien avulla saatiin selville, miten yksittäiset ilmavuodot vaikuttavat seinärakenteiden lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Esimerkkinä seinärakenteen läpi menevä pieni halkaisijaltaan 2 -3 mm pistemäinen reikä voi heikentää rakenteen U-arvoa noin 18 %. Suuremman pinta-alan takia viivamaiset reiät olivat selvästi pahempia riskitekijöitä seinärakenteelle kuin pistemäiset reiät. Simulointien perusteella seinärakenteissa olevat viivamaiset reiät voivat moninkertaistaa seinärakenteen läpi kulkevan lämpövirran verrattuna vastaavaan ehjään rakenteeseen.

Mallinnuksen lähtökohtana rakennus asetettiin 3 Pa ylipaineiseksi, joka on hyvin mahdollinen paine-ero rakennuksissa. Etenkin viivamaisia reikiä mallinnettaessa olivat reiän läpi virtaavat kosteusmäärät 3 Pa:n paine-erolla hälyttävän suuria. Työssä päädyttiin lopputulokseen, että ilmavuodot voivat aiheuttaa rakenteeseen kosteusvaurioita pitkällä aikavälillä.

Comsol Multiphysics soveltuu rakennusosalalle monenlaisiin simulointitehtäviin. Ohjelmiston sujuva käyttö vaatii kuitenkin perinpohjaista paneutumista ohjelmiston toimintaperiaatteisiin. Tästä syystä ohjelmisto tulee tuskin yleistymään jokapäiväisenä insinöörityökaluna, mutta esimerkiksi tutkimuskäyttöön Comsol Multiphysics on oivallinen valinta.

Asiasanat: Ilmavuoto, ilmatiiviys, ilmatiiveys, Comsol Multiphysics, mallinnus, simulointi, virtauslaskenta, faasimuutokset, paine-ero, painesuhteet, lämpövirta, ilmavuodot.

ABSTRACT

Lauri Pellinen

Affect of air leaks on wall structures' heat and moisture conditions, 73 pages

Saimaa University of Applied Sciences, Lappeenranta

Technology, Civil and Construction Engineering

Thesis, 2011

Instructors: Lecturer (DI) Timo Lehtoviita, (DI) Magnus Stagnäs Finnmap Consulting Oy

The target of this thesis was to research the affect of air leaks on wall structures' heat and moisture conditions. The researched wall structures were lightweight thermo long beam wall and precast concrete wall. Air leaks were modelled with Comsol Multiphysics 4.1 software, which is finite element method based simulation and modeling software. The subject of this thesis was given by Finnmap Consulting Oy.

The affect of air leaks on wall structures' heat and moisture conditions was found out through simulations. For example, a small circular hole going through the wall structure with a diameter of 2 - 3 mm can degrade the U-value of the structure approximately 18 %. Linear holes are even worse risks for the wall structure due to the larger area of the hole. Based on the simulations linear holes can multiply the heat flow going through the wall structure compared to corresponding intact wall structure.

The building was set to be 3 Pa overpressured for the modeling. This is a realistic value in buildings. Especially with linear holes the amount of moisture flowing through the hole was alarming with the set pressure conditions. As a result of this thesis it was discovered that air leaks can cause moisture damage to the wall structure as time goes by.

Comsol Multiphysics is a good and suitable software to do different kind of simulations for building engineering. The Comsol Multiphysics needs a lot of involvement in the basic principles of the software. Therefore the software is not likely to become an everyday tool for engineers. But it is suitable for research usage.

Keywords: Air leak, air tightness, Comsol Multiphysics, modeling, simulation, CFD, computational fluid dynamics, phase transition, differential pressure, pressure conditions, heat flow, air leaks.

SISÄLTÖ

KÄSITTEISTÖ.....	5
1 JOHDANTO	7
2 MÄÄRÄYKSET JA VAATIMUKSET	8
2.1 Määräykset 2010	8
2.2 Määräykset 2012	9
3 RAKENNUKSEN ULKOVAIPAN YLEISIMMÄT ILMAVUOTOKOHDAT	11
3.1 Betonielementtirakenteet	11
3.2 Kevytrakenteiset ulkoseinät	12
4 RAKENNUKSEN PAINESUHTEET	14
4.1 Määräykset ja tavoitteet	14
4.2 Paine-erojen muodostuminen rakennuksessa	15
4.3 Eri rakennusten tutkittuja painesuhteita	18
5 ILMAVUOTOJEN MALLINTAMISPROSESSI COMSOL MULTIPHYSICS- OHJELMISTOLLA.....	20
5.1 Ohjelmiston esittely	20
5.2 Ilmavuotojen mallinnusprosessi	25
6 TUTKITUT RAKENTEET JA TULOKSET	36
6.1 Termorankaseinämallit	36
6.1.1 Pistemäiset reiät	37
6.1.2 Viivamaiset reiät	48
6.2 Betonielementtiseinämallit	56
6.2.1 Viivamaiset reiät	58
7 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT	62
KUVAT	67
TAULUKOT	69
LÄHTEET	70

KÄSITTEISTÖ

Höyrynsulku:	Rakennusosassa oleva ainekerros, jonka pääasiallinen tehtävä on estää haitallinen vesihöyryn diffusoituminen lämpimältä puolelta kylmemmällä puolella olevaan rakenteen osaan.
Ilmansulku:	Rakennusosassa oleva ainekerros, joka estää haitallisen ilmavirtauksen rakennusosan läpi puolelta toiselle.
Ilmavuotoluku, n_{50} :	Rakennusvaipan lävitse vaihtuva rakennuksen ilmatilavuus kerran tunnissa ilmavuotoina 50 Pa (Pascal) paine-erolla [1/h]. Ilmavuotoluku kuvaa rakennusvaipan ilmatiiveyttä.
Jatkuvuustila:	Jatkuvuus- eli stationääritilassa olevaan systeemiin tuodaan ja sieltä poistuu vakiomäärä ainetta ja lämpöenergiaa samassa ajassa. Jatkuvuustilassa lämpötilat ja eri aineiden pitoisuudet ovat saavuttaneet tasapainotilan eivätkä muutu ajan kuluessa.
Kapillaarivirtaus:	Huokosalipaineen paikallisten erojen aiheuttamaa nesteen siirtymistä huukoissa aineessa.
Kastepiste:	Lämpötila, jossa ilman vesihöyry tiivistyy vedeksi.
Konvektio:	Konvektiolla tarkoitetaan ilman kokonaispaine-eroista muodostuvaa ilman virtausta. Konvektion suunta on suuremmasta paineesta pienempään paineeseen päin. Ilmavirtaus kuljettaa mukanaan lämpöenergiaa ja kosteutta.
Kosteus:	Kemiallisesti sitoutumaton vesi kaasumaisessa, neste-mäisessä tai kiinteässä olomuodossa.
Kosteuspitoisuus:	Kappaleessa olevan kosteuden massan tai tilavuuden suhde kappaleen kuivaan massaan tai tilavuuteen.
Lämmöneriste:	Rakennusaine tai tarvike, jota käytetään pääasiallisesti tai muun käyttötarkoituksen ohella olennaisesti lämmöneristystarkoitukseen.
Lämmöneristys:	Yhdestä tai useammasta lämmöneristeestä rakennusosaan tehty eristekokonaisuus.
Lämmönläpäisykerroin:	Lämmönläpäisykerroin ilmoittaa lämpövirran, joka jatkuvuustilassa (stationääritilassa) läpäisee pintayksikön suuruisen rakennusosan, kun lämpötilaero raken-

	nusosan eri puolilla olevien ilmatilojen välillä on yksikön suuruinen.
Lämmönvastus:	Ainekerroksen lämmönvastus ilmoittaa tasomaisen, tasapaksun ja tasa-aineisen ainekerroksen eri puolilla, eri lämpötiloissa olevien isotermisten pintojen lämpötilaeron ja ainekerroksen läpi kulkevan lämpövirran tiheyden suhteen, kun ainekerros on jatkuvuustilassa.
Lämpöenergiantarve:	Rakennuksen lämmityksen lämpöenergiantarve on se lämpömäärä, joka rakennuksen lämmitysjärjestelmän tulee rakennuksen lämmitettäviin tiloihin luovuttaa, jotta vaaditut lämpöolosuhteet ylläpidetään.
Lämpövirta:	Lämpömäärä, joka tuodaan tai joka poistuu systeemistä, jaettuna ajalla.
Rakennuksen vaippa:	Rakennuksen vaippaan sisältyvät ne rakennusosat, jotka erottavat lämpimän, puolilämpimän, erityisen lämpimän tai jäähdytettävän kylmän tilan ulkoilmasta, maaperästä tai lämmittämättömästä tilasta. Vaippaan eivät kuulu rakennuksen sisäiset erilaisia tiloja toisistaan erottavat rakennusosat.
Suhteellinen kosteus:	Ilmassa olevan todellisen vesihöyrypitoisuuden suhde ilman kyllästysvesihöyrypitoisuuteen.
Vesihöyryn diffuusio:	Kaasuseoksessa (esimerkiksi ilma) vakiokokonaispaineessa tapahtuva vesimolekyylien liike, joka pyrkii tasottamaan kaasuseoksen höyrypitoisuus- tai höyryn osapaine-eroja.
Vesihöyryn konvektio:	Kaasuseoksen sisältämän vesihöyryn siirtyminen kaasuseoksen mukana sen liikkuessa kokonaispaine-eron vaikutuksesta.

1 JOHDANTO

Rakennusten ulkovaipan ilmanpitävyyteen on alettu kiinnittämään enemmän huomiota vasta viime vuosien aikana. Rakennuksen ulkovaipan epätiiveyskohdat voivat aiheuttaa monia seurannaisvaikutuksia rakenteille sekä asukkaille. Ilmavuotojen vähentäminen parantaa asumisviihtyisyyttä, kun ilmavuodot eivät aiheuta vedon tunnetta. Hyvällä ilmatiiveydellä voidaan myös pienentää kosteusvaurioiden riskiä, parantaa ilmanvaihdon toimivuutta ja säädettävyyttä sekä säästää rakennuksen lämmityskustannuksissa.

Opinnäytetyössä tutkitaan, miten rakennuksen ulkovaipassa olevat yksittäiset ilmavuotokohdat vaikuttavat ulkoseinän lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Tutkittavat seinärakenteet ovat kevytrakenteinen termorankaseinä sekä betonielementtiseinä. Tarkoituksena on saada selville, miten yksittäinen ilmavuutokohta vaikuttaa seinän läpi virtaavaan lämpövirtaan ja miten kosteus kertyy rakenteeseen. Tutkimukset tehdään Comsol Multiphysics 4.1 -ohjelmistolla, joka on elementtimenetelmään perustuva monifysikaalinen mallinnus- ja simulointiohjelma.

Comsol Multiphysics -simulaatioiden analysoimisen lisäksi opinnäytetyöhön kuuluu teoriaosa, jossa käsitellään oleelliset rakennusten ilmanpitävyyteen liittyvät määräykset, rakennuksen ulkovaipan yleisimmät ilmavuotokohdat sekä rakennuksen painesuhteet. Opinnäytetyössä käsitellään myös ilmavuotojen mallintamisprosessi Comsol Multiphysics -ohjelmistolla. Työssä ei käsitellä ilmatiiveyden mittaamista eli rakennusten painekoetta eikä ilmatiiveyden yleisiä rakennusratkaisuja.

2 MÄÄRÄYKSET JA VAATIMUKSET

2.1 Määräykset 2010

Rakennuksen ilmanpitävyyteen liittyvät vaatimukset on määritelty Suomen rakentamismääräyskokoelman osan C3 Rakennuksen lämmöneristys alaluvussa 2.3 Vaipan ja tilojen välisten rakenteiden ilmanpitävyys. Sen mukaan sekä rakennuksen vaipan, että tilojen välisten rakenteiden tulee olla niin ilmanpitäviä, että vuotokohtien läpi tapahtuvat ilmavirtaukset eivät aiheuta merkittäviä haittoja rakennuksen käyttäjille tai rakenteille ja rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmä voi toimia suunnitellusti. Erityistä huomiota tulee kiinnittää rakenteiden liitosten ja läpivientien suunnitteluun sekä rakennustyön huolellisuuteen. Rakenteisiin on tarvittaessa tehtävä erillinen ilmansulku.

Rakennusmääräyskokoelman alaluvussa 2.3 painotetaan myös, että ikkunoiden ja ovien liittymät ympäröiviin rakenteisiin tulee olla ilmanpitäviä ja kestää käytössä esiintyvät rasitukset oleellisesti vaurioitumatta.

Rakenteiden kosteustekniseen toimivuuteen liittyviä vaatimuksia on käsitelty Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa C2 Kosteus. Sen mukaan rakenteet ja LVI-järjestelmät tulee toteuttaa siten, ettei sisäisistä ja ulkoisista kosteuslähteistä tuleva vesihöyry, vesi tai lumi pääse haitallisesti tunkeutumaan rakenteisiin. Rakenteen on myös kyettävä kuivumaan haittaa aiheuttamatta.

Rakennuksessa olevat ilmavuodot heikentävät oleellisesti rakennuksen energiatehokkuutta. Ilmavuodot otetaan energiatehokkuuden suhteen huomioon Suomen rakentamismääräyskokoelman osan D3 alaluvussa 3.3 Rakennuksen vuotoilman lämpöhäviön laskenta. Kyseisessä alaluvussa on määrätty, että rakennuksen vertailulämpöhäviön laskennassa käytetään ilmanvuotolukua $n_{50} = 2,0$ 1/h. Rakennuksen suunnitteluratkaisun lämpöhäviön laskennassa puolestaan käytetään rakennuksen vuotoilmakertoimena arvoa $n_{50} = 4,0$ 1/h. Jos il-

manpitävyys osoitetaan esimerkiksi painekoemenetelmällä, voidaan vuotoilma-kerroin laskea kaavan 2.1 mukaisesti.

$$n_{\text{vuotoilma}} = n_{50}/25 \quad (2.1)$$

,jossa

$n_{\text{vuotoilma}}$ = rakennuksen vuotoilma-kerroin, kertaa tunnissa, 1/h

n_{50} = rakennuksen ilmanvuotoluku 50 Pa paine-erolla, kertaa tunnissa, 1/h

2.2 Määräykset 2012

Ympäristöministeriö on julkaissut 28.9.2010 luonnoksen uudisrakennusten uusista energiatehokkuusvaatimuksista. Muutoksella on tarkoitus siirtyä kokonaisenergiatarkasteluun, jossa otetaan huomioon eri energiamuodot ja tuotantomenetelmät. Uusilla määräyksillä tavoitellaan 20 prosentin parannusta energiatehokkuuteen. Kokonaisenergiatarkasteluun siirtyminen on saanut yleisesti paljon kannatusta. Haasteet ovat rakennusalan energiaosaamisessa ja sen nopeassa päivittämisessä. Osaamisen lisääntyminen ja uudet innovaatiot hyödyttävät alaa ja samalla koko kansantaloutta.

Huomattava muutos olisi eri lämmitysenergiamuodoille tulevat kertoimet sekä vaatimukset uusiutuvan energian osuudesta lämmitysenergiassa. Uusiutuvien energialähteiden hyödyntäminen on tulevaisuudessa keskeistä, sillä suunnitelmassa on kymmenen vuoden sisällä siirtyä lähes nollaenergiarakentamiseen.

Ympäristöministeriön 28.9.2010 julkaisemassa luonnoksessa esitetty kokonaisenergiakulutus (E-luku) on laskettava yksilöllisesti jokaiselle uudisrakennukselle. E-luku saadaan laskemalla yhteen netto-ostoenergian ja energiamuotojen kertoimien tulot energiamuodoittain. E-luku kertoo rakennuksen vuotuisen netto-ostoenergiankulutuksen lämmitettyä nettoalaa kohden. Energiatehokkuusluvun laskennassa ilmatiiveys huomioidaan uudella tavalla. Tällä hetkellä ilmatiiveyden laskennassa käytetään vuotoilmavirran laskentakaavassa kohteen ilma-

määrää, kun taas uudessa tavassa käytetään vaipan pinta-alaa. Tämä tasapuo-
listaa varsinkin yksikerroksisen ja monikerroksisen rakennuksen vertailua. Kaa-
vassa 2.2 on esitetty E-luvun laskentaan tarvittava vuotoilmamäärä, jota tullaan
käyttämään 1.1.2012 lähtien. Tällä hetkellä käytössä oleva laskentakaava vuo-
toilmamäärälle on esitetty kaavassa 2.3.

$$q_{v, \text{ vuotoilma}} = \frac{q_{50}}{3600x} A \quad (2.2)$$

q_{50} rakennusvaipan keskimääräinen ilmanvuotoluku, $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$, kohta 3.6.1

A rakennusvaipan pinta-ala (alapohja mukaan luettuna), m^2

x kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35, kaksikerroksisille 24,
kolmi- ja nelikerroksisille 20 ja viisikerroksisille tai korkeammille
rakennuksille 15

3600 kerroin, joka muuttaa ilmavirran m^3/h yksiköstä m^3/s yksikköön.

$$q_{v, \text{ vuotoilma}} = \frac{n_{\text{vuotoilma}} V}{3600} \quad (2.3)$$

$q_{v, \text{ vuotoilma}}$ vuotoilmavirta, m^3/s

$n_{\text{vuotoilma}}$ rakennuksen vuotoilmakerroin, kertaa tunnissa, 1/h

V rakennuksen tilavuus, m^3

3600 kerroin, joka muuttaa ilmavirran m^3/h yksiköstä m^3/s yksikköön.

Laskentatavan muuttumisen lisäksi vuoden 2012 luonnoksessa on määrätty,
että ilmanpitävyys on osoitettava mittaamalla. Näin ollen kaikkiin uudisraken-
nuksiin on tehtävä painekoe tai vastaava ilmanpitävyyden mittaus. Tämä luo
selvästi paineita rakentajille rakentamisen laadun nostamiseen, etenkin ilman-
pitävyyden kannalta

3 RAKENNUKSEN ULKOVAIPAN YLEISIMMÄT ILMAVUOTO-KOHDAT

3.1 Betonielementtirakenteet

Betoniulkoseinien betonikuorien ilmanläpäisevyys on hyvin pieni, jos valu on tehty oikeaoppisesti eikä rakenteeseen ole jäänyt koloja. Näin ollen riskialttiit alueet muodostuvat rakenteiden epäjatkuvuuskohtiin. Näitä ovat betonirakenteissa muun muassa pysty- ja alasaumat, ikkuna- ja oviaukkojen liitoskohdat sekä läpiviennit.

Betonielementin pystysauma muodostuu ulkoa sisälle päin elastisesta saumamassasta, pohjanauhasta, mineraalivillasta ja betonivalusta. Ilmatiiveydeltään paras lopputulos saavutetaan juotosvalulla. Oikein tehty juotosvalu toimii hyvin rakenteen ilmansulkuna. Rakenteet kuitenkin elävät ja hyvin tyypillisesti valun ja elementin liitoskohtaan muodostuu ajan myötä selvä pystysuuntainen halkeama. Halkeamia pyritään estää riittävän tiheällä saumaraudoituksella. Myös valuaikaiset huolimattomuudet lisäävät huomattavasti epäonnistumisen riskiä. Saumaan voi jäädä huomattavia ”rotankoloja”, joiden myötä ilmatiiveys sisäkuoren suhteen menetetään. Mineraalivillan ulkopinnassa oleva uritus mahdollistaa ilman virtauksen ulkokuoren ja mineraalivillan rajapinnassa. Teoriassa siis pelkkä sisäkuoren ilmavuoto voi aiheuttaa koko rakenteen läpi ulottuvan ilmavuodon.

Betonielementteihin tulevat ikkunat ja ovet voidaan asentaa joko valmiiksi tehtaalla tai erikseen työmaalla. Elementtitehtailla on käytössä omat laatujärjestelmät laadun takaamiseksi, joiden ansiosta valmiiksi tehtaalla asennetut ovet ja ikkunat ovat pääosin ilmatiiveydeltään kiitettäviä. Suuremman riskin ilmatiiveyden kannalta aiheuttaa työmaalla tehdyt ikkuna ja ovi asennukset. Puutteelliseen lopputulokseen voi vaikuttaa usean eri tekijän summa. Työmaan valvonta ja laatu on hankalammin kontrolloitavissa kuin tehdasolosuhteissa. Asennustyöt joudutaan lähes poikkeuksetta tekemään taivasalla jolloin etenkin talviset olo-

suhteet tuovat oman lisähaasteensa. Nykyään työmailla ollaan kuitenkin tietoisempia ilmatiiveistä liitosratkaisuista ja näin riskit tunnistetaan paremmin.

3.2 Kevytrakenteiset ulkoseinät

Tässä työssä kevytrakenteisilla ulkoseinillä tarkoitetaan termorankaseiniä ja perinteisiä puurunkoisia ulkoseiniä. Termorankaseinässä kantavana materiaalina on termoprofiili eli termoranka. Termoranka on kuumasinkitystä teräsohutellevystä valmistettu taivutettu profiili, joka on tarkoitettu ulkoseinien runkojen rakentamiseen. Termorangan uumassa on aukotus, joka katkaisee kylmäsilan ja pienentää merkittävästi profiilin lämmönjohtavuutta. (Termoprofiili) Rakenteessa itsessään ei ole ilmatiiviitä rakennekerroksia, jolloin seinässä on oltava erillinen ilmansulku. Ilmansulkuna voi toimia esimerkiksi polyeteenikalvo, jonka tyypillinen paksuus on 0,2 mm.

Kevytrakenteisten ulkoseinien ilmanpitävyys on täysin riippuvainen ilmansulkukerroksen ehjyydestä. Ilmansulkukalvo sijoitetaan normaalisti sisäpinnan sisäverhouslevyn taakse tai noin 50 mm:n etäisyydelle lämmöneristeen sisäpuolelle. Parempi vaihtoehto on sijoittaa ilmansulkukalvo lämmöneristeen sisään, jolloin minimoidaan siihen syntyvien reikien määrä. Seinään upotetut sähkörsiat ja sähköputkitukset saadaan siten asennettua rikkomatta ilmansulkua. Sähkörsioiden alueet ovat hyvin normaaleja ilmanvuotokohtia kevytrakenteisissä ulkoseinissä. Ilmansulkukerros on huomattavasti alttiimpi rei'ille, jos se sijaitsee heti sisäverhouslevyn takana. Sisäverhouslevyn lävistävät kiinnitykset voivat aiheuttaa pistemäisen reiän ilmansulkuun. Jos kiinnitys tehdään runkotalpan kohdalle, jossa ilmansulku on puristusliitoksessa, ei tätä ongelmaa ole. Upotettujen sähkörsioiden asentaminen seinään ilmatiiviisti on huomattavasti hankalampaa, koska ilmansulku ottaa takana vastaan. Ongelmaa voi auttaa mahdollisimman löysästi asennettu ilmansulku, jolloin sähköasennukset voidaan tehdä ilmansulkua mahdollisimman vähän rikkomatta.

Kevytrakenteisten ulkoseinien kriittisiä alueita ovat myös seinärakenteen epä-jatkuvuuskohdat ja ilmansulun jatkoskohdat. Aikaisemmin jatkoskohdat on lähes poikkeuksetta tiivistetty erilaisilla rakennusteipeillä. Teippiliitokset voivat vuosien kuluessa menettää tiiveytensä, jolloin rakenteeseen syntyy runsaasti ilmavuoto-kohtia. Rakennusteipin ilmatiiveyttä pidetään hyvin epävarmana, koska se on hyvin riippuvainen liiman kiinnittyvyydestä. Ilmansulun ollessa pölyinen tai muuten likainen voi kiinnitys jäädä olemattomaksi. Suunnittelussa ja rakentamisvaiheessa tulisi pyrkiä siihen, että kaikki ilmansulun jatkoskohdat tulisivat kahden puun väliin puristusliitoksiksi ja liitokseen tulisi tiivistenauha. Riittävä ja pysyvä puristuskiinnitys aikaansaadaan noin 300 mm:n välein tehdyllä ruuvi-kiinnityksellä. Jatkoskohtaa ei pidä tehdä nurkkaan, vaan aina selvästi toisen seinärakenteen puolelle.

Rakennuksen ulkovaipan läpi menevät LVISA-asennukset läpäisevät ilmansul-
kukerroksen. Läpivientien puutteellinen tiivistys aiheuttaa rakenteisiin ilma-
vuotoja. Nykyään läpivienteihin on kehitelty lukematon määrä tuotteita, joilla
taataan tiivis lopputulos. Aikaisemmin läpiviennit on teipattu höyrynsulkuteipillä,
jolloin tiiveys on ollut hyvin kyseenalainen. Olemassa olevien läpivientien tiivis-
täminen jälkeinpäin on hankalaa. Uudelleen tiivistäminen edellyttäisi rakentei-
den purkamista, joka ei pelkästään ilmatiiveyden parantamiseksi ole kustan-
nustehokasta tai muilta osin kannattavaa. Mahdollisuus läpivientien tiivistämi-
selle voi tulla esimerkiksi peruskorjauksen yhteydessä. Läpivienti voi myös ajan
myötä menettää tiiveytensä joutuessaan erilaisiin rasituksiin. Tällaisia ovat esi-
merkiksi rakenteiden mahdolliset liikkeet sekä kosteuden ja lämpötilan muutok-
set.

4 RAKENNUKSEN PAINESUHTEET

4.1 Määräykset ja tavoitteet

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa D2 Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto on määrätty, että paineet eivät saa aiheuttaa rakenteisiin pitkäaikaista kosteusrasitusta. Rakennus suunnitellaan yleensä ulkoilmaan nähden hieman alipaineiseksi, jotta voitaisiin välttyä rakenteiden kosteusvaurioilta. Alipaine ei kuitenkaan saa yleensä olla suurempi kuin 30 Pa.

Suosittelavan paine-eron määrä riippuu olennaisesti rakennuksen ilmanvaihtotavasta. Taulukossa 4.1 on esitetty tavoitteelliset paine-erot ilmanvaihtotavasta riippuen (negatiivinen paine-ero tarkoittaa alipainetta).

Taulukko 4.1 Tavoitteelliset paine-erot ilmanvaihtotavasta riippuen (Asumisterveysohje 2009)

Ilmanvaihtotapa	Paine-ero	Huomautuksia
Painovoimainen ilmanvaihto	0... -5 Pa ulkoilmaan 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan.
Koneellinen poistoilmanvaihto	-5... -20 Pa ulkoilmaan 0... -5 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan.
Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, ilmanvaihtolämmitys	0... -2 Pa ulkoilmaan 0 Pa porraskäytävään	Paine-erot vaihtelevat sään mukaan.

Taulukosta 4.1 voidaan havaita, että paine-erot vaihtelevat voimakkaasti sään mukaan. Etenkin tuuli hankaloittaa halutun paine-eron säilyttämistä rakennuksessa.

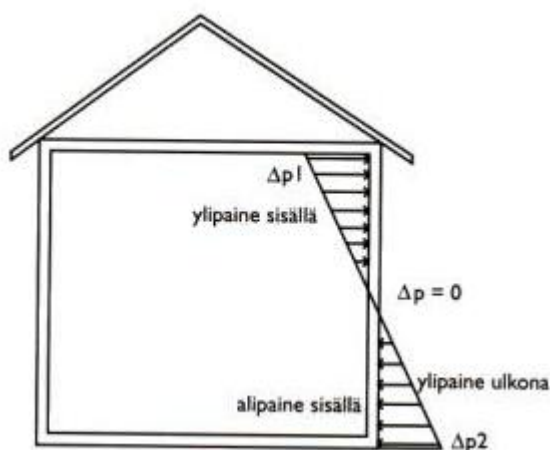
4.2 Paine-erojen muodostuminen rakennuksessa

Rakennuksen painesuhteet vaikuttavat olennaisesti ilmavirtauksiin rakennuksissa. Ilma virtaa aina korkeammasta paineesta matalamman paineen suuntaan (ylipaineesta alipaineeseen). Kosteuskonvektiossa ilmavirtaukset kuljettavat mukanaan vesihöyryä. Vesihöyry siirtyy ilmavirtauksien mukana, koska vesihöyry on yksi ilman osakaasu.

Rakennuksen painesuhteisiin vaikuttaa kolme eri tekijää:

- ilman lämpötilaerot (savupiippuvaikutus)
- ilmanvaihto
- tuuli.

Ulko- ja sisäilman lämpötilaeron aiheuttamaa paine-eroa kutsutaan savupiippuvaikutukseksi. Paine-ero muuttuu rakennuksen pystysuunnassa, kun lämmin ilma nousee kylmää ilmaa kevyempänä ylös. Tasatiiviissä rakennuksessa ilman lämpötilaero aiheuttaa kuvan 4.1 mukaisen painejakauman ulkoseinään. Rakennuksen ollessa ulkoilmaa lämpimämpi sen alaosiin kohdistuu alipaine ja yläosiin ylipaine ulkoilmaan verrattuna.

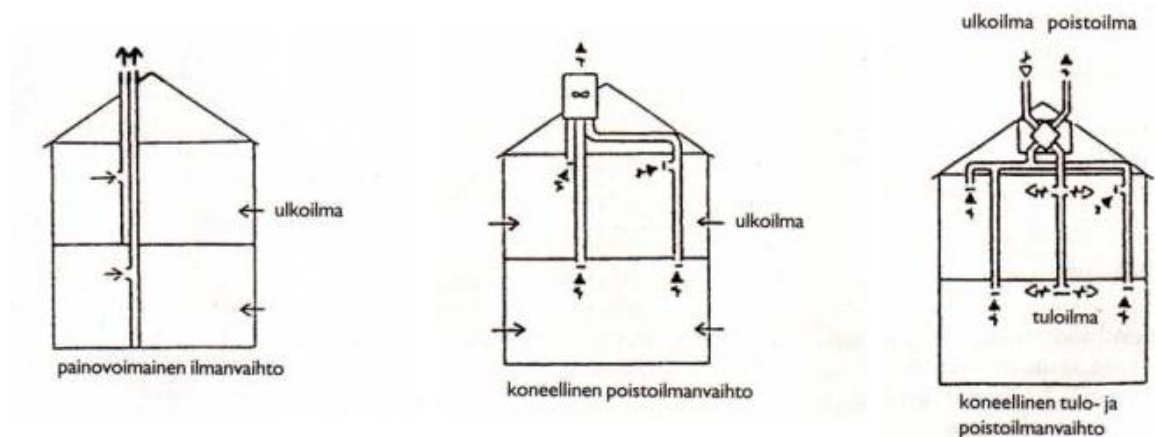


Kuva 4.1 Lämpötilaeroista aiheutuva tasatiiviiseen rakennukseen kohdistuva painejakauma (Sisäilmayhdistys.)

Kuvassa 4.1 on merkitty neutraaliakselia $\Delta p = 0$. Neutraaliakselilla sisä- ja ulkopuolen välinen paine-ero on 0 Pa. Käytännössä neutraaliakselin sijaintia on vaikea määrittää, koska se riippuu rakennusvaipan ilmavuotokohtien korkeus- asemista ja niiden virtausvastuksista, jotka voivat vaihdella suuresti rakennuksessa. (Sisäilmayhdistys.)

Savupiippuvaikutuksen merkitys on suurin talvella, jolloin ulko- ja sisäilman välinen lämpötilaero on suuri. Luonnollisesti savupiippuvaikutusta korostaa myös rakennuksen korkeus. Mitä korkeampi rakennus on, sitä suurempi ylipaine rakennuksen yläosaan kertyy. Pahimmillaan savupiippuvaikutuksen aiheuttama rakennuksen yläosan ylipaine voi kumota ilmanvaihdon aiheuttaman alipaineen. Tällöin rakennusvaipan yläosan ilmavuotokohtien läpi pääsee virtaamaan ilmaa sisältä ulospäin. (Sisäilmayhdistys.) Näiden konvektiovirtausten mukana kulkeva kosteus on yhtenä tutkimuskohteena tässä opinnäytetyössä.

Ilmanvaihdon aiheuttama paine-ero riippuu käytettävästä ilmanvaihtojärjestelmästä. Kuvassa 4.2 on esitetty eri ilmanvaihtojärjestelmien toimintaperiaatteet.



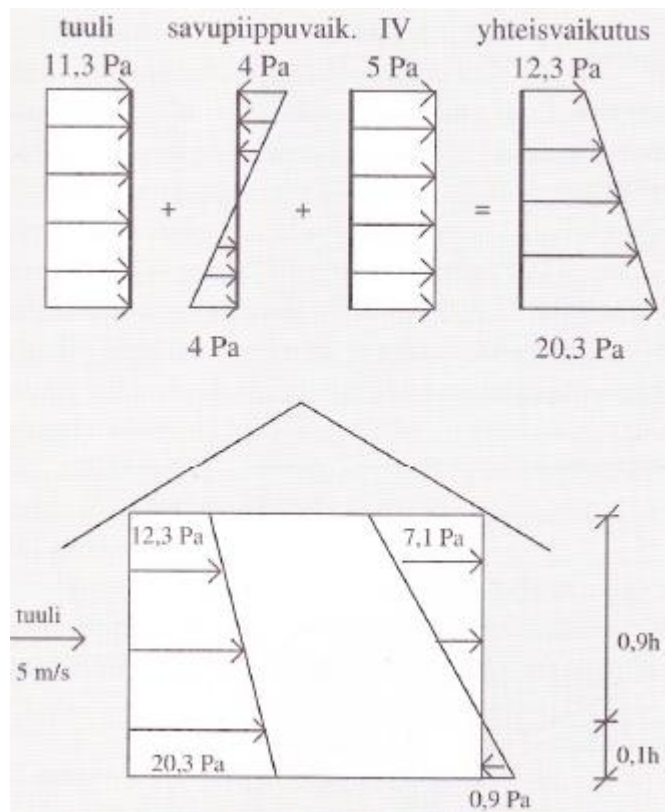
Kuva 4.2 Ilmanvaihtojärjestelmien periaateratkaisut (Sisäilmayhdistys.)

Nykyään harvoin käytettävän painovoimaisen ilmanvaihdon toiminta on riippuvainen sisä- ja ulkoilman välisestä lämpötilaerosta ja tuulesta. Painovoimaisen ilmanvaihdon periaate näkyy kuvassa 4.2 vasemmalla. Tässä menetelmässä lämmennyt, käytetty ilma poistuu katolle johdettujen poistokanavien kautta, ja

korvausilma otetaan huonekohtaisesti raitisilmaventtiilien avulla. Kuvassa 4.2 oikealla näkyy kaksi vaihtoehtoa koneelliselle ilmanvaihdolle. Näiden ilmanvaihtojärjestelmien aiheuttamat painesuhteet rakennuksessa riippuvat ilmanvaihtolaitteiston säädöistä ja tehokkuudesta, rakennuksen vaipan tiiviyydestä sekä tulo- ja poistoilmaventtiilien määrästä ja sijainnista.

Kolmas rakennuksen painesuhteisiin vaikuttava tekijä on tuuli. Tuulen aiheuttama paine rakennukseen riippuu tuulen suunnasta ja nopeudesta ja rakennuksen geometriasta. Jos rakennuksen tuulenpuoleinen seinä on muita seiniä epätiivimpi, rakennuksen sisäpuolelle muodostuu tuulen osalta ylipainetta. Tuulen aiheuttamia painesuhteiden muutoksia rakennuksessa voi laskea pinnan muotokertoimien avulla. Muotokertoimilla ilmaistaan rakennuksen vaippaan muodostuva painejakauma. Positiivinen muotokerroin tarkoittaa ylipainetta pinnalla ja negatiivinen muotokerroin alipainetta. Käytännössä tuulen vaikutuksien huomioiminen voidaan tehdä vain likimääräisesti, koska yksittäisen kohteen tarkka numeerinen mallintaminen on yleensä mahdollista vain tutkimusprojekteissa. (Sisäilmayhdistys.)

Rakennuksen painesuhteet määräytyvät savupiippuvaikutuksen, ilmanvaihdon ja tuulen yhteisvaikutuksesta. Tyypillisesti painesuhteet vaihtelevat eri vuorokauden- ja vuodenaikoina. Tuuli ja ilmanvaihtolaitteiston toiminta voivat muuttaa painesuhteita vuorokauden aikana hyvin nopeasti ja radikaalisti. Ilman lämpötilaeroista johtuva savupiippuvaikutus muuttaa rakennuksen painesuhteita vuodenaikojen mukaan. Epäsuotuisin tilanne syntyy, kun kokonaispaine-ero aiheuttaa rakennukseen ylipaineen, jolloin ilma virtaa ilmavuotokohdista sisältä ulospäin. Kosteusvaurioriski syntyy, kun lämmin ilma jäähtyy nopeasti rakenteessa olevassa ilmavuotokohdassa. Pitkän ylipaineen seurauksena rakenteeseen voi näin kertyä kosteutta. Kuvassa 4.3 on lähtökohtana esimerkkitalanne jossa oletetaan, että rakennukseen kohdistuva tuulennopeus on 5 m/s. Rakennuksen seinien tiiviys oletetaan samaksi kaikissa seinissä. Ulkoilman lämpötila on 0 °C ja sisäilman lämpötila on +20 °C. Rakennuksen vapaan ilmatilan korkeus on 10 m ja ilmanvaihtona on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, joka aiheuttaa rakennukseen 5 Pa:n alipaineen ulkoilmaan verrattuna.



Kuva 4.3 Tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutus rakennuksen painesuhteisiin. (Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus)

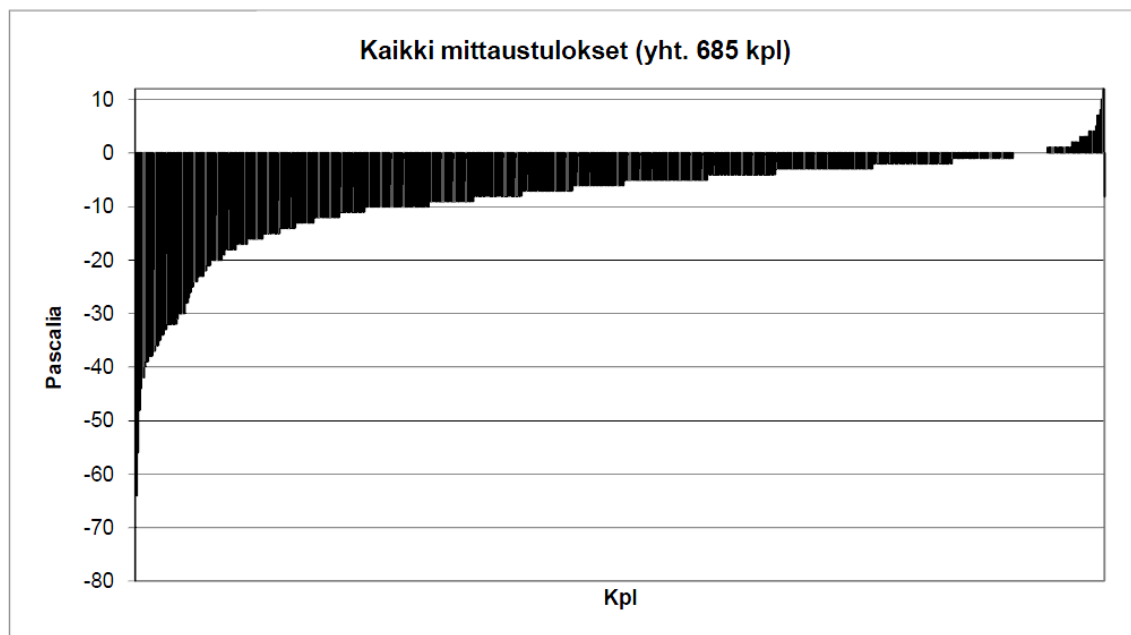
Kuvasta 4.3 voidaan havaita, että suojanpuoleisen seinän yläosaan muodostuu selvä ylipaine ulkoilmaan verrattuna. Tuulenpuoleinen ulkoseinä puolestaan on kokonaan selvästi alipaineinen. Kuvan 4.3 yläreunasta voi lisäksi tarkastella, miten yksittäiset tekijät vaikuttavat rakennuksen painejakaumaan tuulenpuoleisella ulkoseinällä. (Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus.)

4.3 Eri rakennusten tutkittuja painesuhteita

Kim Seppänen on julkaissut 9.2010 tutkimuksen rakennusten keskimääräisistä painesuhteista ulkovaipan yli. Seppänen on tutkimuksessaan selvittänyt paineeroja 176:ssa kohteessa. Yhteensä mittaustuloksia on 685 kappaletta. Mittaustuloksista 538 oli kerrostaloja, 24 omakotitaloja, 53 rivitaloja ja loput 70 muita kohteita. Muita kohteita olivat mm. kaupat, päiväkodit, koulut ja toimistot.

Paine-erot on mitattu tilojen normaalissa käyttötilanteessa säätöihin millään tavalla puuttumatta. Mittaukset on tehty ikkuna-aukoista 1 - 1,5 metriä lattiapinnan yläpuolelta. Seppänen ilmoittaa mittaustuloksien tarkkuudeksi ± 1 Pa. Kovalla tai puuskittaisella tuulella ei ole tehty mittauksia lainkaan, koska se voi vääristää tuloksia huomattavasti. Mittaukset ovat kaikki Seppäsen itse tekemiä ja näin vertailukelpoisia keskenään.

Seuraavassa diagrammissa (kuva 4.4) näkyy kaikkien kohteiden mittaustulokset. Koko aineiston keskimääräinen paine-ero ulkoilmaan nähden oli -8 Pa. Suurin alipaine oli 80 Pa ja suurin ylipaine 12 Pa. Yli 30 %:ssa mittaustuloksista alipaineisuus ylitti 10 Pa:a.



Kuva 4.4 Kaikkien tutkimuskohteiden (176 kpl) sisäilman painesuhteet (Pa) ulkoilmaan nähden 685 mittauksessa. (Seppänen.)

Seppäsen tutkimissa kohteissa hieman yli kolmasosassa ali- tai ylipaine oli Asumisterveysoppaan 2009 tavoitteellisten arvojen ulkopuolella. Taulukosta 4.2 voi huomata, että kerrostalojen ylimmät kerrokset (4. kerros ja siitä ylöspäin), joissa ilmanvaihtotapana on painovoimainen poisto, paine-erojen keskiarvo on ylipaineen puolella. Suurimmat alipaineet ovat vastaavasti kerrostalojen ylimmissä kerroksissa, joissa ilmanvaihtotapana on koneellinen poisto. Tutkimusai-

neiston perusteella ei kuitenkaan voida tehdä yleistä oletusta ylimpien kerrosten vallitsevista painesuhteista, koska aineistoa on suhteellisen vähän.

Taulukko 4.2. Paine-eromittausten kohdekohtaiset keskimääräiset tulokset (Pa) ulkoilmaan nähden rakennustyypeittäin, ilmanvaihtotavoittain ja eri kerroksissa. Kerroksittaisissa tuloksissa on kyseessä ko. kohteen ko. kerroksen keskiarvo. (Seppänen.)

	Yhteensä		Painovoimainen poisto		Koneellinen poisto		Koneellinen tulo ja poisto	
			dp=-2 Pa, N= 23		dp=-9 Pa, N= 69		dp=-6 Pa, N= 91	
	Pa	kpl	Pa	kpl	Pa	kpl	Pa	kpl
Omakotitalot	-2	24	-1	10	-6	5	-2	9
Rivitalot	-7	53	-1	4	-8	43	-4	10
Kerrostalot	-19	16	-5	1	-21	10	-15	7
Muut kohteet	-6	70	-4	8	-5	11	-6	65
Alin kerros	-7	420	-3	27	-9	228	-5	165
2. kerros	-7	145	-3	22	-12	46	-6	86
3. kerros	-12	54	-5	10	-20	14	-11	30
4. kerros	-14	32	2	9	-25	16	-9	7
5. kerros	-15	13	7	2	-22	8	-12	3
6. ja 7. kerros	-14	12	8	1	-18	8	-12	3

Seppäsen tutkimista kohteista ylipaineisia oli noin 4 %. Näissä kohteissa kosteuskonvektioriski on todellinen. Tämän työn laskelmissa ylipaineena on pääosin käytetty 3 Pa, joka on täysin mahdollinen paine-ero rakennuksissa.

5 ILMAVUOTOJEN MALLINTAMISPROSESSI COMSOL MULTIPHYSICS-OHJELMISTOLLA

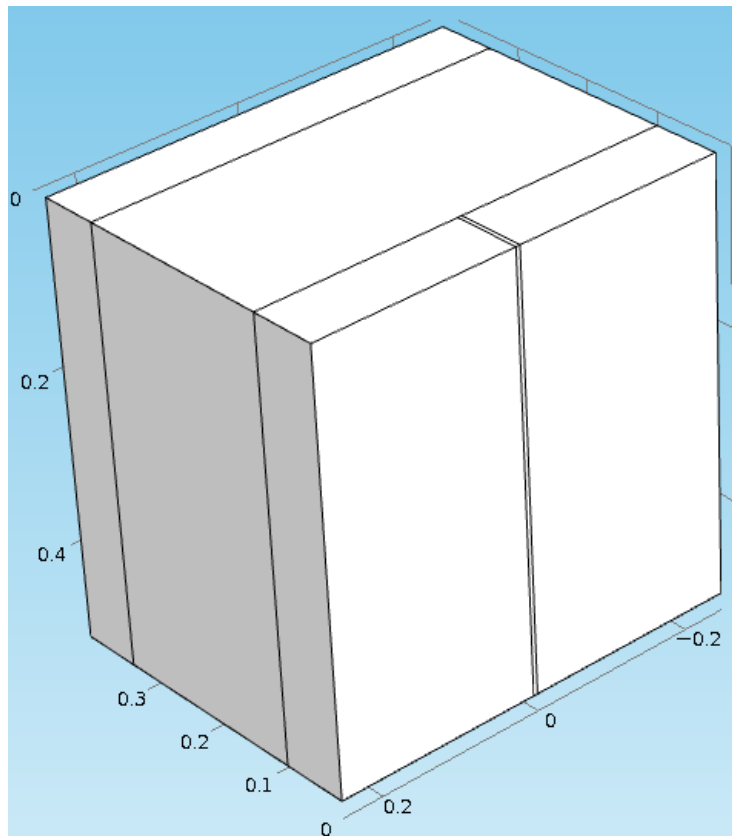
5.1 Ohjelmiston esittely

Comsol - konserni tarjoaa ohjelmistoratkaisuja monifysikaalisten ongelmien mallintamiseen. Comsolin asiakkaita ovat muun muassa tutkimuslaitokset ja oppi-

laitokset. Comsol Multiphysics on elementtimenetelmään (Finite Element Method) perustuva osittaisdifferentiaaliyhtälöiden (PDE) numeeriseen ratkaisemiseen tarkoitettu ohjelmisto. Se soveltuu mallinnus- ja simulointiympäristöksi teknistieteellisiin sovellutuksiin, muun muassa seuraaville alueille(CSC):

- aaltoyhtälöiden ratkaiseminen
- aineen- ja massansiirtoprosessit
- akustiikka
- biotieteet
- geofysiikka
- kemian tekniikka
- klassinen- ja kvanttifysiikka
- lämmönsiirtoprosessit
- ominaisarvoanalyysi
- optiikka
- osittaisdifferentiaaliyhtälöt
- puolijohteiden mallintaminen
- rakenteiden mekaniikka
- virtausmekaniikka.

Mallinnusprosessi koostuu geometrian luomisesta, elementtiverkon tekemisestä, käytettävien moduulien lisäämisestä, ratkaisemisesta ja tulosten visualisoinnista. Mallinnusta aloittaessa on ensimmäisenä valittava käytettävä avaruusulottuvuus. Vaihtoehtoja ovat muun muassa 3D, 2D, 2D aksiaalisymmetria ja 1D. Tässä työssä käytettävät ulottuvuudet olivat 2D, 2D aksiaalisymmetria ja 3D. Kuvassa 5.1 näkyy tässä työssä tehty betonielementtiseinämällin 3D -geometria, jossa on sisäkuoressa viivamainen reikä.

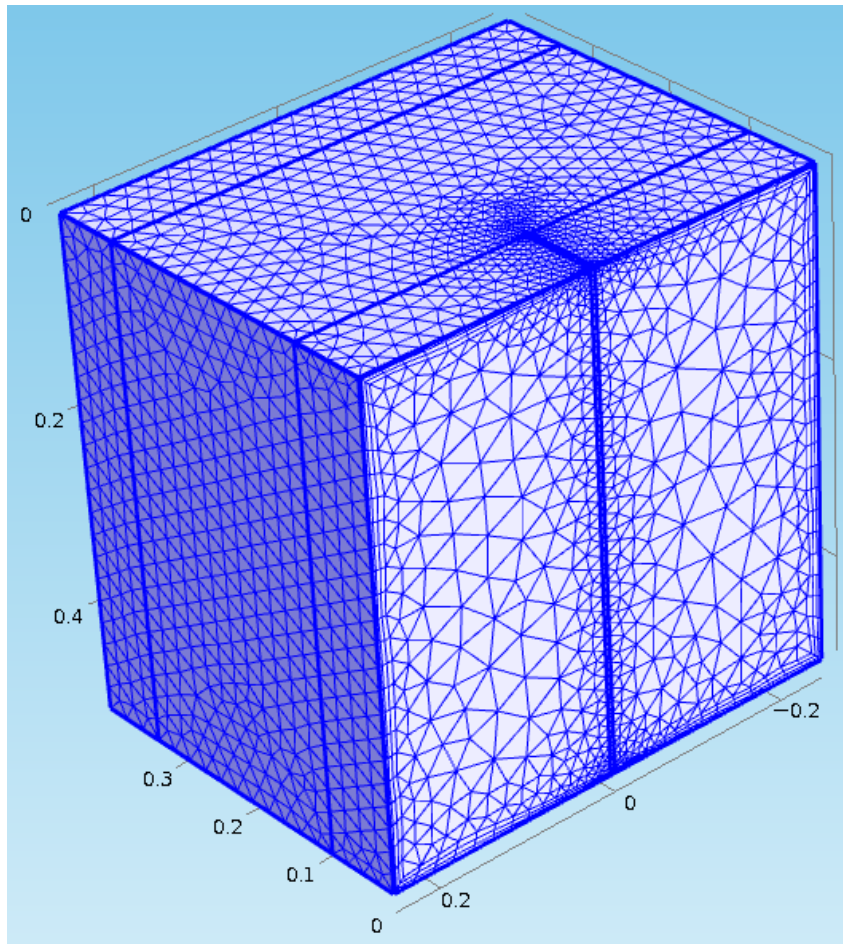


Kuva 5.1 Comsol Multiphysics’illä tehty 3D -mallin geometria betonielementtiseinästä, jossa on sisäkuoressa viivamainen reikä.

Kuvasta 5.1 voidaan havaita, että betonielementtiseinän geometria koostuu yksittäisistä erikseen luoduista osista. Kuvan 5.1 edessä näkyvä seinän sisäkuori koostuu kolmesta eri osasta: sisäkuoren vasen puolikas, keskellä oleva ohut viivamainen reikä ja sisäkuoren oikea puolikas.

Geometrian tekemisen jälkeen mahdollistuu elementtiverkon luominen. Tämä osio on ohjelman rungossa nimellä Mesh. Elementtiverkko jakaa tarkasteltavan geometrian äärellisiin osiin. Verkko koostuu elementeistä, jotka puolestaan määrittelevät solmupisteet, jotka sijaitsevat jossain elementtien alueella tai rajoilla, ratkaisumallista riippuen. Solmupisteiden ulkopuoliset arvot saadaan selville solmupisteistä interpoloimalla. Interpolointi johtaa likiarvoisiin tuloksiin, joiden tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä tiheämpää verkkoa, joka sisältää enemmän solmuja. (Bhaskaran & Collins.)

Kuvassa 5.2 näkyy tässä työssä käytetyn 3D -betonielementtiseinämallin elementtiverkko.



Kuva 5.2 Comsol Multiphysics’illä tehty betonielementtiseinän elementtiverkko.

Kuvasta 5.2 voidaan havaita, että verkkoa on tihennetty keskellä näkyvän ohuen viivamaisen reiän kohdalla. Tihennetyn verkon alueella ratkaistavat solmupisteet ovat lähempänä toisiaan, joka mahdollistaa tarkempien tulosten saavuttamisen.

Seuraavaksi malliin tuodaan tarvittavat moduulit. Ohjelman nykyinen perusversio Comsol Multiphysics sisältää tietyt fysiikat, joiden avulla voidaan tehdä perusmallinnusta. Tarjolla on lisäksi sovelluskohtaisia moduuleja, jotka eivät kuulu ohjelman perusversioon. Comsolin sovelluskohtaiset lisämoduulit ovat

- AC/DC Module
- Acoustics Module
- Batteries & Fuel Cells Module

- CFD Module
- Chemical Reaction Engineering Module
- Earth Science Module
- Heat Transfer Module
- MEMS Module
- Plasma Module
- RF Module
- Structural Mechanics Module.

Lisäksi on tarjolla materiaalikirjasto, optimointimoduuli ja liitântä tuotteita. Liitântä tuotteet kattavat muun muassa linkityksen CAD-ohjelmiin ja Matlab:iin. (COMSOL.) Ilmavuotojen mallinnuksessa tarvittavat moduulit olivat Heat Transfer Module, Earth Science Module ja Chemical Reaction Engineering Module.

Jokaisen moduulin alta löytyy lukuisa määrä tarkennettuja fysiikoita. Esimerkiksi Heat Transfer Module sisältää muun muassa seuraavat fysiikat: Bioheat Transfer, Conjugate Heat Transfer, Heat Transfer in Thin Shell ja Heat Transfer in Porous Media. Käyttäjän on tiedettävä, mitä fysiikkaa mihinkin malliin tarvitsee soveltaa. Ilmavuotojen mallinnuksessa Heat Transfer -moduulin alta käytettiin Heat Transfer in Porous Media -fysiikkaa, koska tämä fysiikka sisältää lämmön siirtymisen huokoisessa väliaineessa, kuten mineraalivillassa.

Kun tarvittavat fysiikat on lisätty ja malli hiottu omaa tapausta vastaavaksi, on vuoro suorittaa mallin ratkaisu. Comsolissa on jokaista käytettävää moduulia varten oma Study-osio, jossa määritellään ratkaisijan asetukset. Jos malli on esimerkiksi ajasta riippuvainen, määritellään Study-osiossa ratkaistavat ajanhetket halutunlaisiksi. Comsol Multiphysics ottaa yksittäiset tulokset talteen vain niiltä ajanhetkiltä, jotka käyttäjä on Study-osioissa määritellyt. Ratkaisun läpi ajamiseen voi kulua useita päiviä, jos malli on hyvin raskas. Esimerkiksi ajastariippuvuus ja useiden eri moduulien yhtäaikainen käyttö voi tehdä mallista raskaan.

Kun ohjelma on saanut mallin ratkaistua, ilmestyy Results-osioon tulokset. Ohjelman avulla käyttäjä voi lisäksi hankkia useita eri tyyppisiä tuloksia, joita ohjelma ei automaattisesti itse ratkaise. Yksi vaihtoehto tähän on Derived Values -

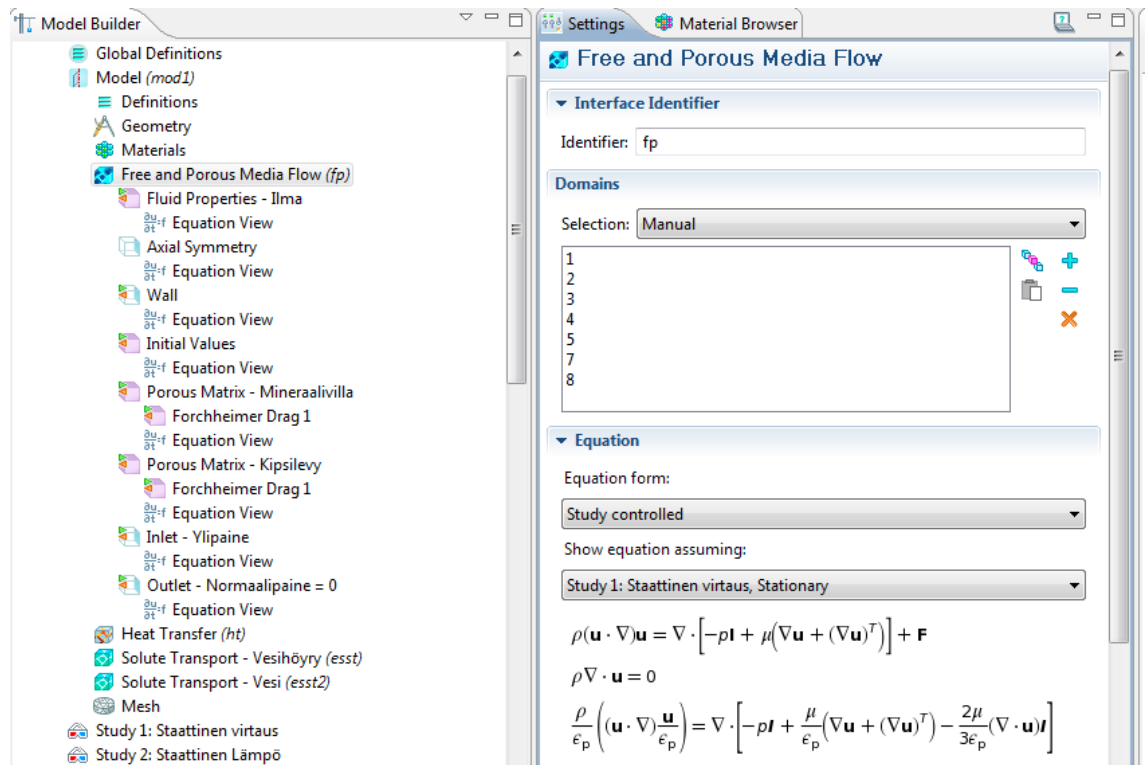
osio, jonka avulla tarkastellusta mallista voi ratkoa haluamiansa tietoja. Ajasta riippuvista malleista puolestaan voi tehdä helposti animaatioita, jotka havainnollistavat saatuja tuloksia.

5.2 Ilmavuotojen mallinnusprosessi

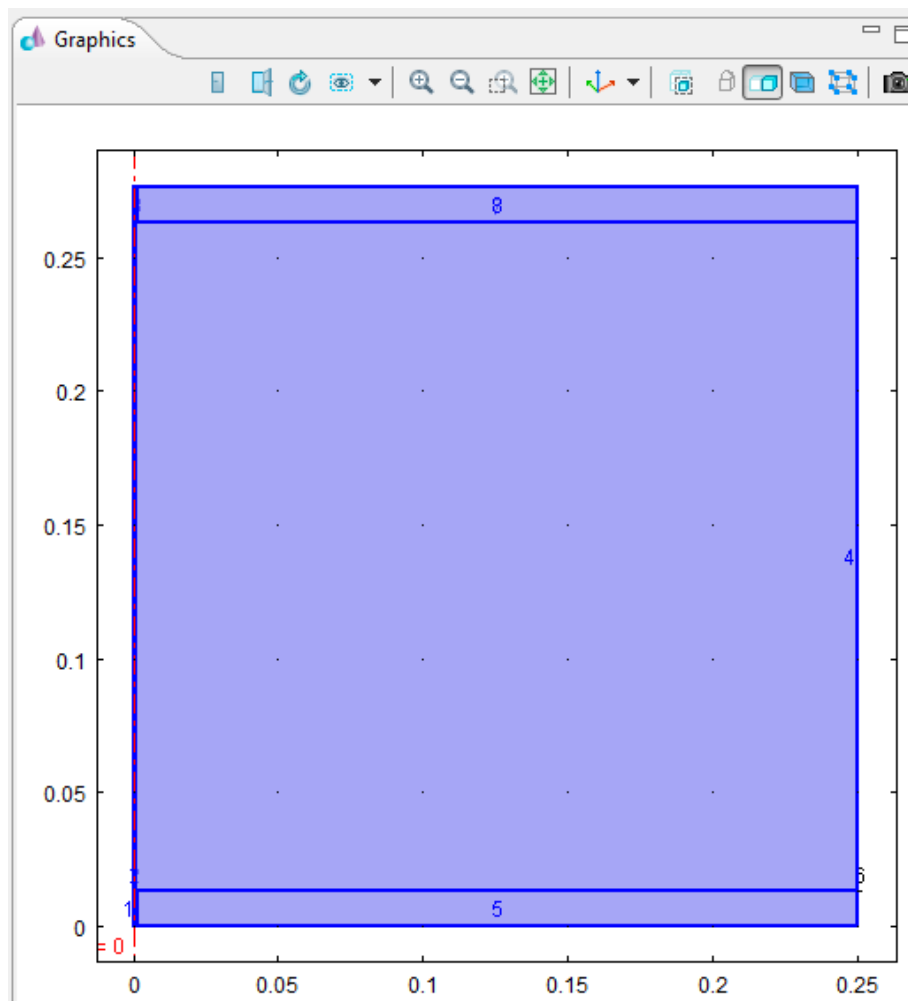
Ilmavuotojen mallinnuksesta erityisen haastavaa tekee se, että mallintajan on hallittava sekä mallinnusohjelmiston käyttö, että rakennusfysiikan monet eri osa-alueet, virtaustekniikka mukaanlukien. Ilmavuotojen mallinnuksessa tarvitaankin useita eri Comsolin tarjoamia lisämoduuleita.

Mallinnus aloitetaan tekemällä halutunlainen geometria mallille valitussa avaruusulottuvuudessa. Lähtötietoina tarvitaan lisäksi tietoja käytettävistä materiaaleista. Tarvittavat materiaalitiedot riippuvat siitä, mitä ilmiöitä tutkitaan. Tässä työssä geometrian jälkeen malliin lisättiin ilmavirtaukset. Tutkittaessa ilmavirtauksia huokoisissa väliaineissa on tunnettava käytettävien väliaineiden, kuten mineraalivillan ilmanläpäisevyys (permeability) ja huokoisuus (porosity). Käyttäjän on myös määritettävä rakenteen yli vaikuttava paine-ero, joka vaikuttaa oleellisesti ilmavirtauksiin. Käytetty fysiikka oli Free and Porous Media Flow, joka tarkoittaa virtausta vapaassa ja huokoisessa väliaineessa. Free and Porous Media Flow sisältyy lisämoduuleihin Earth Science, Chemical Reaction Engineering, CFD sekä Batteries and Fuel Cells. Tämän osion avulla saadaan tulokset mallissa olevista ilmavirtauksista ja niiden nopeuksista.

Kuvassa 5.3 näkyy termorankaseinämällin Free and Porous Media Flow -osio. Comsol Multiphysics -ohjelmistossa vasemmassa reunassa on Model Builder-osio, jossa malli rakennetaan vaihe vaiheelta. Ohjelmistossa keskellä näkyy sillä hetkellä tarkastelussa oleva tekijä. Kuvasta 5.3 näkee, että valittuna tummempana on Free and Porous Media Flow, jolloin sen ominaisuudet näkyvät keskellä. Ohjelmistossa oikeassa reunassa sijaitsee Graphics-ikkuna, jossa näkyy mallin geometria, elementtiverkko tai tuloksia mallista (kuva 5.4).



Kuva 5.3 Termorankaseinämallin Free and Porous Media Flow-osio.



Kuva 5.4 Termorankaseinämallin Graphics ikkuna, jossa geometria näkyvissä, kun valittuna on Free and Porous Media Flow. Malli on aksiaali- eli pyörähdyssymmetrinen, jonka takia mallia tarkastellaan Comsol Multiphysicsissä puolikkaana. Pyörähdyssymmetrinen mallista tulee, kun Model Builder osioon lisätään Axial Symmetry symmetriaehto.

Comsol Multiphysics numeroi tehdyt grafiikan osat. Kuvassa 5.3 valittuna olevassa Free and Porous Media Flow:ssa näkyy Domains-osio. Tässä osiossa valitaan, mitkä kaikki geometrian osat kuuluvat Free and Porous Media Flow'hun. Kuvan 5.3 numeroista voidaan havaita, että numero 6 puuttuu listalta. Numero 6 kuvaa polyeteenikalvoa, jossa ilmavirtauksia ei luonnollisesti esiinny, jolloin se on pitänyt poistaa listalta. Kuvassa 5.3 Domain-osion alla näkyy Equation eli laskennassa käytettävät yhtälöt.

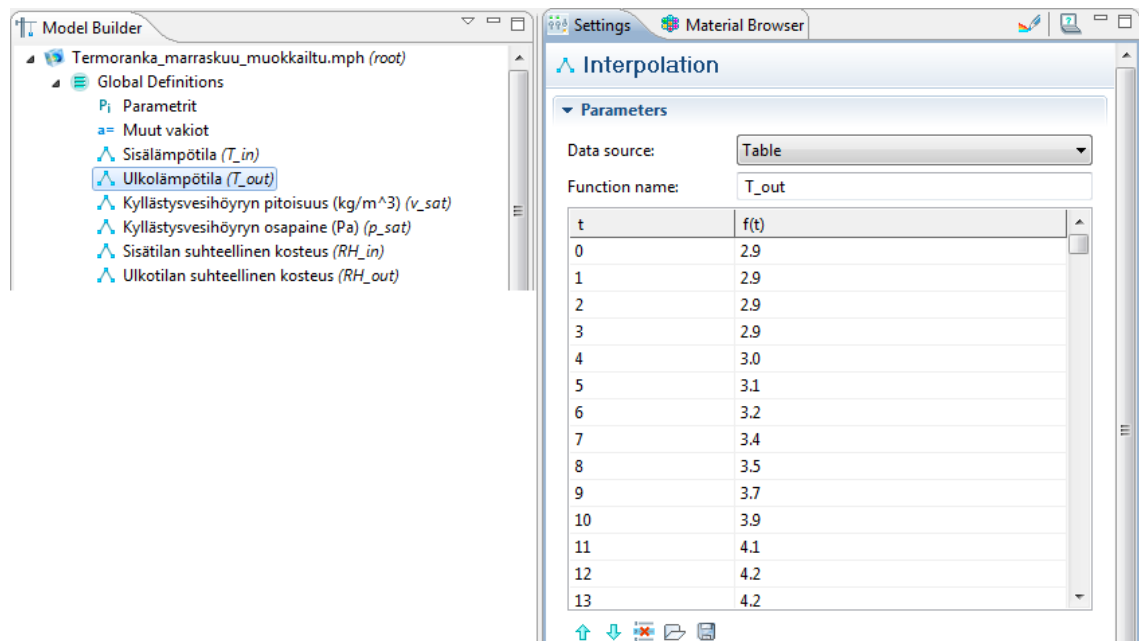
Virtauslaskennan yhtälöiden perustana toimivat 1800-luvun alussa kehitetyt Navier-Stokesin yhtälöt, joilla kuvataan liikkeen, aineensiirron ja lämmön prosesseja. Yhtälöt ottavat huomioon virtauksen viskositeetin. Analyyttistä ratkaisua yh-

tälöihin ei ole, mutta ne voidaan diskretisoida ja ratkaista numeerisesti. Yhtälöt kuuluvat ohjelmaan itseensä eikä niitä ole tarve muokata.

Kuvassa 5.3 vasemmalla Free and Porous Media Flow'n alla näkyy, mitä kaikkea virtaus-osioon pitää tässä tapauksessa sisällyttää. Porous Matrix mineraalivillan ja kipsilevyn alla näkyy ylimääräisenä lisätty Forchheimer Drag. Forchheimer Drag korjauksen avulla huomioidaan fluidin (ilman) virtaus avonaisessa kanavassa, jonka vieressä on huokoista materiaalia, kuten mineraalivillaa. Nämä ovat asioita, jotka käyttäjän on itse tunnettava ja kyettävä itsenäisesti lisäämään.

Virtaus-osion valmistuttua voi käyttäjä ratkaista Study-osiossa ilmavirtaukset tarkasteltavassa mallissa. Seuraava malliin lisätty fysiikka tässä työssä oli Heat Transfer in Porous Media eli lämmönsiirtyminen huokoisessa väliaineessa. Heat Transfer in Porous Media sisältyy moduuleihin Heat Transfer, Earth Science, Chemical Reaction Engineering, CFD sekä Batteries and Fuel Cells. Tämän osion lopputuloksina saadaan lämpövirrat rakenteen läpi sekä rakenteen lämpötilajakauma valitussa lämpötilaerossa. Lisäksi ohjelmistolla voidaan laskea muun muassa rakenteen U-arvo.

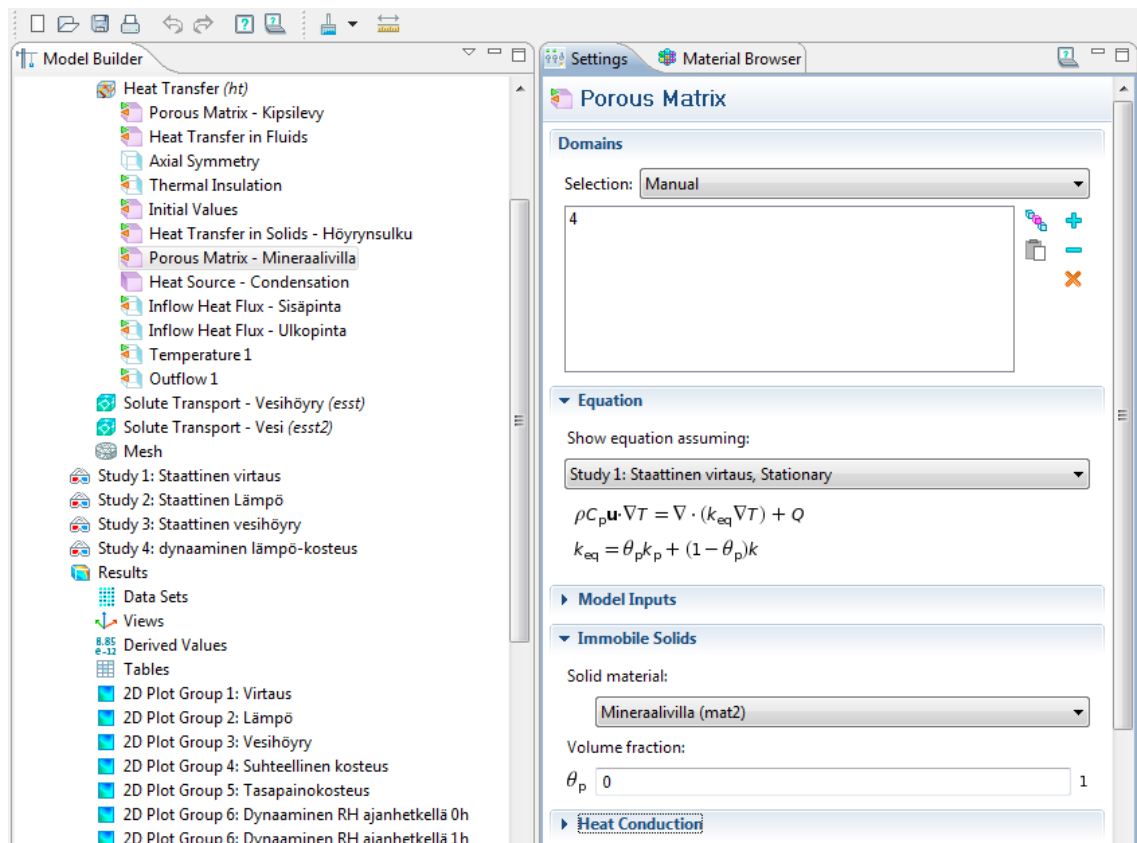
Lähtötietoina tarvitaan materiaalien lämmönjohtavuus (thermal conductivity), tiheys (density) sekä ominaislämpökapasiteetti vakiopaineessa (heat capacity at constant pressure). Lisäksi on tiedettävä rakenteen sisä- ja ulkopuolella vallitsevat lämpötilat. Ajastariippuvissa malleissa vaihtelevista lämpötiloista tehdään funktiot. Funktioiden lisääminen tapahtuu Comsolissa Model Builder-osion alla kohdassa Global Definitions. Tässä työssä sisälämpötilojen funktioille annettiin nimeksi T_{in} ja vastaavasti ulkolämpötilojen funktioille T_{out} (kuva 5.5).



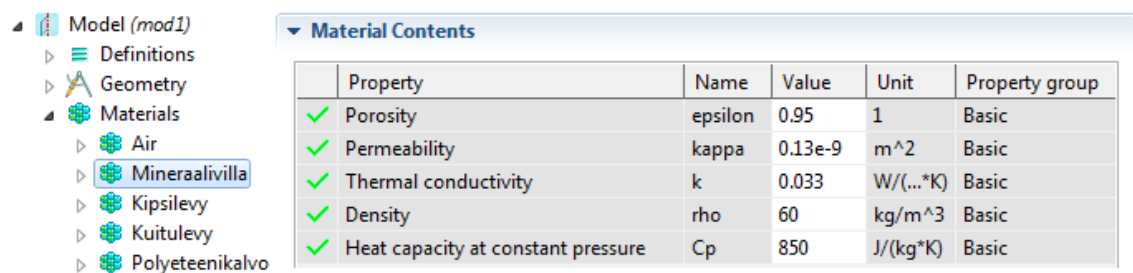
Kuva 5.5 Comsol Multiphysics:n Model Builder osiosta valittu Ulkolämpötilan (T_{out}) funktio.

Kuvassa 5.5 oikealla näkyy valittuna oleva Ulkolämpötilan (T_{out}) funktio. Vasemmanpuoleisessa pystysarakkeessa oleva parametri t kuvaa ajanhetkiä yhden tunnin välein. Oikeanpuoleisessa sarakkeessa näkyy lämpötilan arvo kyseisellä ajanhetkellä. Esimerkiksi ajanhetkellä 11 tuntia on ulkolämpötila $+4,1^{\circ}\text{C}$.

Heat Transfer -osiossa määritellään ja luodaan kaikki lämmönsiirtymisen mallintamiseen tarvittavat tekijät (kuva 5.6). Kuvan 5.6 oikeasta alareunasta kohdasta Solid material voidaan havaita, että valittuna on Mineraalivilla (mat2). Tällä tavalla ohjelmassa luodaan yhteys itse luomien materiaalien (kuva 5.7) ja fysiikoiden välille. Geometrian ja fysiikan välinen linkitys näkyy kuvan 5.6 oikean yläreunan Domains-osassa. Valittuna on geometrian osa 4, joka on tässä mallissa mineraalivilla.



Kuva 5.6 Comsol Multiphysics'n Model Builder -osion Heat Transfer in Porous Media. Valittuna oikealla näkyy Porous Matrix -mineraalivillan asetukset.



Kuva 5.7 Comsol Multiphysics'n Materials -osio. Oikealla näkyy valittuna olevan mineraalivillan materiaaliominaisuudet.

Comsol Multiphysics lisää automaattisesti reunaehtoja kunkin käytetyn fysiikan alle. Heat Transfer in Porous Media -fysiikkaan ohjelmisto lisää automaattisesti kohdat Porous Matrix 1, Heat Transfer in Fluids 1, Axial Symmetry 1 (mallin ollessa aksiaalisymmetrinen), Thermal Insulation 1 sekä Initial Values 1. Käyttäjän on itse tiedettävä, mitä ehtoja mallissa on oltava ja mitkä sieltä on jätettävä pois. Kuvassa 5.6 näkyy, mitä kaikkea ajastariippuvaisessa termorankaseinä-

mallissa on oltava. Koska kuvan 5.6 termorankaseinämallissa on ilmapuoto, siirtyy lämpöä myös konvektion avulla, jolloin on luotava yhteys lämmönsiirtymisen ja ilmapuotausten välille. Yhteys näkyy mineraalivillan osalta Equation-kohdan alla (kuva 5.6).

Ilmapuotojen mallinnuksesta erityisen haastavaa tekee malliin lisättävä kosteus-osio. Kosteuden vaikuttaessa on malliin luotava yhteys lämmön ja kosteuden välille. Heat Transfer in Porous Media fysiikassa kosteus vaikuttaa kohdissa Heat Source – Condensation, Inflow Heat Flux – Sisäpinta ja Inflow Heat Flux – Ulkopinta (kuva 5.6). Näiden osioiden sisälle on lisättävä oikeat yhtälöt, jotka linkittyvät Model Builder -osion alle luotuihin muuttujiin vesihöyryn diffuusiovas-tuskertoimet, yleiset vesihöyrymuuttujat (kuva 5.8) sekä muut vakiot (kuva 5.9).

a= Variables

Geometric Scope

Geometric entity level: Entire model

Variables

Name	Expression	Unit	Description
D_p	$2.0e-7 \cdot \text{abs}(T[1/K])^{(0.81)}/p_{\text{amb}}[1/\text{Pa}] \cdot 1[\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})]$	s	
D_v	$D_p \cdot (R_g/M_w) \cdot T$	m ² /s	Vapor diffusivity in free air, mass concentration
RH	$\text{max}(\text{min}(m_v/v_{\text{sat}}(T[1/K]))[\text{kg}/\text{m}^3], 1), 0)$		Relative humidity
p_v	$m_v \cdot R_g/M_w \cdot T$	Pa	Vapor pressure
p_v_in	$RH_{\text{in}}(t[1/\text{hour}]) \cdot p_{\text{sat}}(T_{\text{in}}(t[1/\text{hour}]))[\text{degC}][1/K][\text{Pa}]$	Pa	Interior vapor pressure
p_v_out	$RH_{\text{out}}(t[1/\text{hour}]) \cdot p_{\text{sat}}(T_{\text{out}}(t[1/\text{hour}]))[\text{degC}][1/K][\text{Pa}]$	Pa	Exterior vapor pressure
m_v_in	$RH_{\text{in}}(t[1/\text{hour}]) \cdot v_{\text{sat}}(T_{\text{in}}(t[1/\text{hour}]))[\text{degC}][1/K][\text{kg}/\text{m}^3]$	kg/m ³	Interior vapor mass concentration
m_v_out	$RH_{\text{out}}(t[1/\text{hour}]) \cdot v_{\text{sat}}(T_{\text{out}}(t[1/\text{hour}]))[\text{degC}][1/K][\text{kg}/\text{m}^3]$	kg/m ³	Exterior vapor mass concentration
v_init	$RH_{\text{init}} \cdot v_{\text{sat}}(T_{\text{init}}[1/K])[\text{kg}/\text{m}^3]$	kg/m ³	Initial vapor mass concentration

Kuva 5.8 Comsol Multiphysics -termorankaseinämallin sisälle syötetyt yleiset vesihöyrymuuttujat.

Yleisten vesihöyrymuuttujien (kuva 5.8) hallitseminen ja yhdistäminen toimivasti Comsol Multiphysics -malliin on yksi vaikeimmista asioista mallinnettaessa ilmapuotoja rakenteissa.

a= Variables

Variables

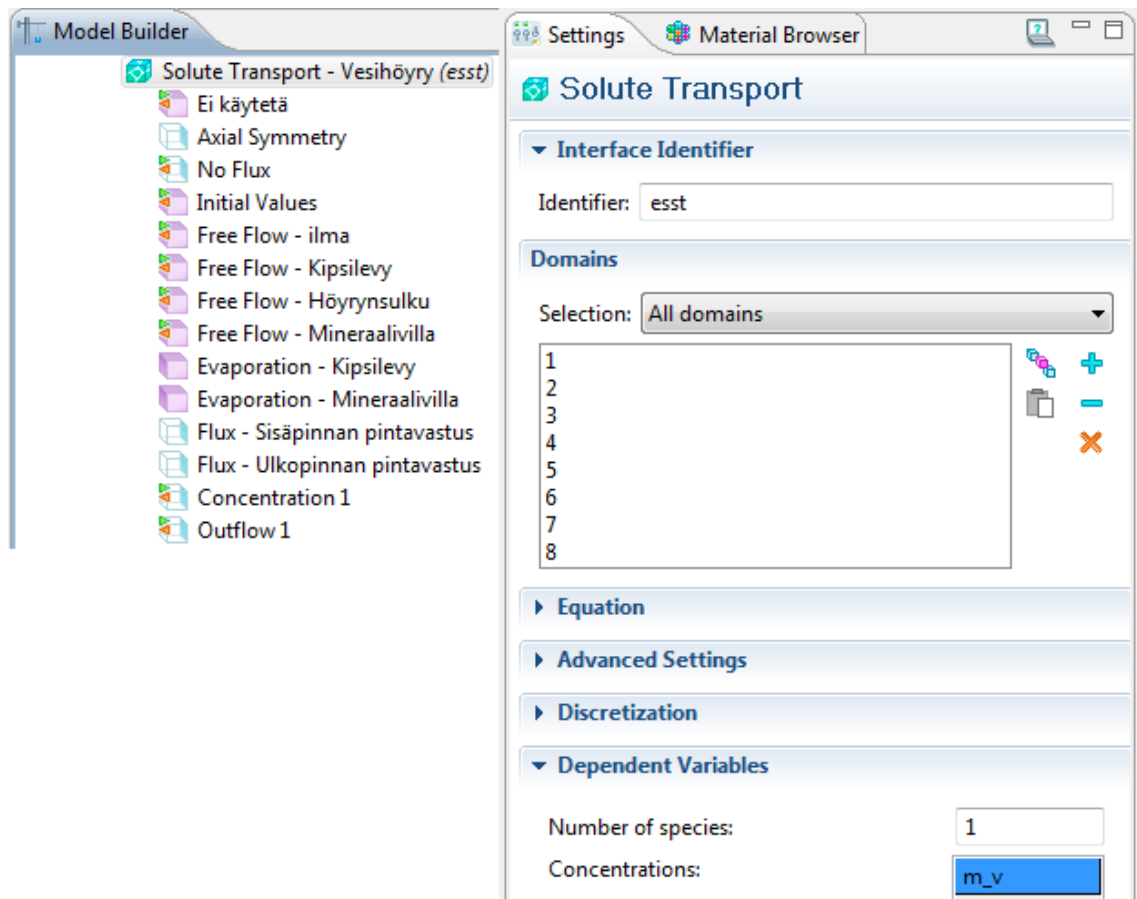
Name	Expression	Unit	Description
alpha_out	$1/0.056[\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}]$	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Outdoor heat transfer coefficient
alpha_in	$1/0.13[\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}]$	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Indoor heat transfer coefficient
alpha_min	$3.5[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]$	$\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$	Minimum heat transfer coefficient
beta_p_out	$7.0\text{e-}9[\text{s}^4\cdot\text{K}/\text{m}/\text{kg}]\cdot(\max(\alpha_{\text{min}},\alpha_{\text{out}}-6.5[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]))$	s/m	Outdoor vapor convection
beta_p_in	$7.0\text{e-}9[\text{s}^4\cdot\text{K}/\text{m}/\text{kg}]\cdot(\max(\alpha_{\text{min}},\alpha_{\text{in}}-4.5[\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}]))$	s/m	Indoor vapor convection constant
beta_out	$\beta_{\text{p_out}}\cdot R_{\text{g}}/M_{\text{w}}$	$\text{m}/(\text{s}\cdot\text{K})$	Outdoor vapor transfer coefficient
beta_in	$\beta_{\text{p_in}}\cdot R_{\text{g}}/M_{\text{w}}$	$\text{m}/(\text{s}\cdot\text{K})$	Interior vapor transfer coefficient
Mw	$18.016[\text{g}/\text{mol}]$	kg/mol	Water molecular weight
Rg	$8.3143[\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}]$	$\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$	Gas constant
H_evap	$2500[\text{kJ}/\text{kg}]$	J/kg	Evaporation heat
p_amb	$1[\text{atm}]$	Pa	Ambient pressure

Kuva 5.9 Comsol Multiphysics -termorankaseinämallin sisälle syötetyt muut vakiot.

Yleisten vesihöyrymuuttujien laskennassa tarvitaan useita eri vakioita (kuva 5.9). Näitä vakioita ovat muun muassa kaasuvakio (R_{g}), höyrystymislämpö (H_{evap}) ja veden molekyylipaino (M_{w}).

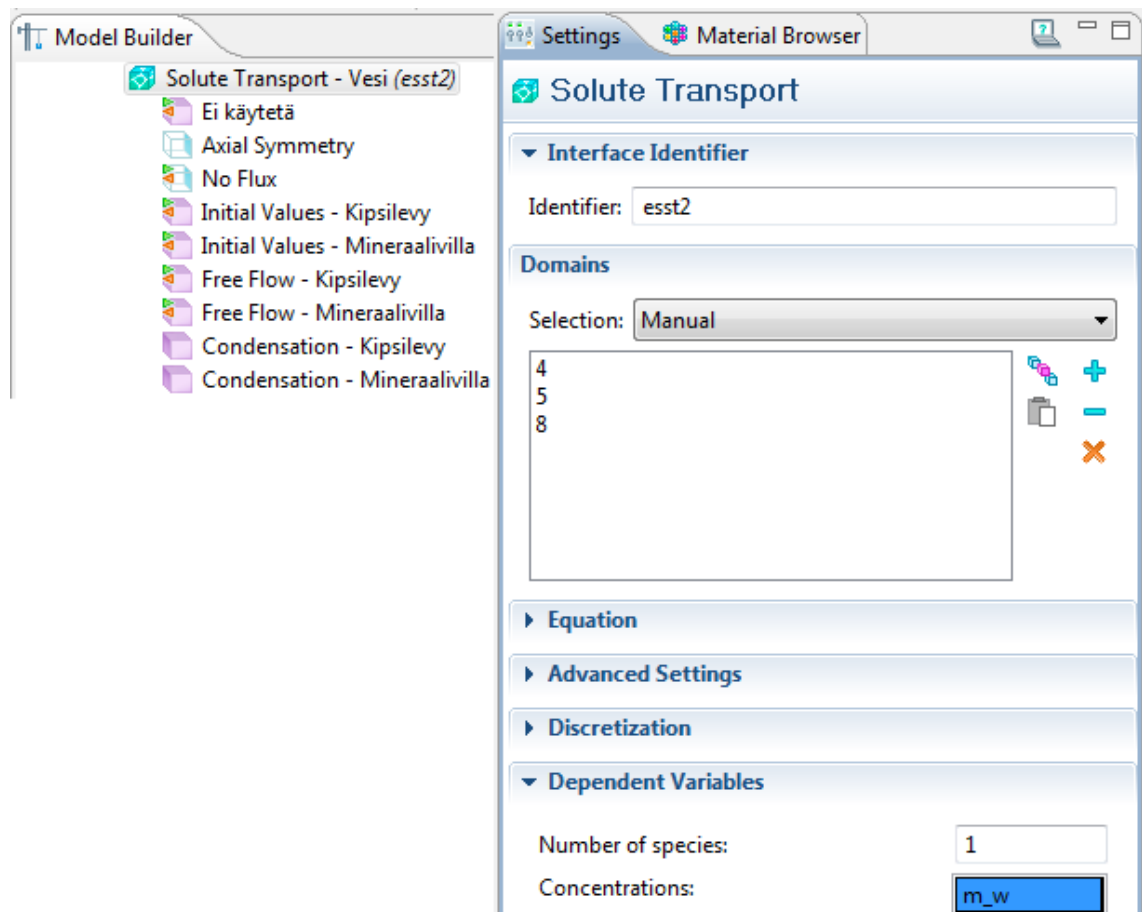
Ilmavirtausten ja lämmön siirtymisen jälkeen mallista puuttuu vielä kosteuden siirtyminen ja mahdollinen kosteuden tiivistyminen vedeksi. Kosteuden liikkuminen rakenteessa on kuitenkin yksi mielenkiintoisimmista asioista tutkittaessa seinärakenteita, joissa on ilmavuotoja. Kosteuden lisääminen malliin on erittäin haastavaa ja se vie ylivoimaisesti suurimman osan mallinnusajasta. Kosteuden mallintamiseen käytettiin tässä työssä Solute Transport fysiikkaa. Solute Transport sisältyy Earth Science moduuliin.

Termorankaseinämallin osio Solute Transport-Vesihöyry näkyy kuvassa 5.10. Kuvassa 5.10 näkyvissä Evaporation–Kipsilevy sekä Mineraalivilla otetaan huomioon vesihöyryn haihtumisreaktiot kyseisissä materiaaleissa. Reaktioyhtälöissä tarvitaan lähtötietoina materiaalien vesipitoisuudet suhteellisen kosteuden muuttuessa. (WUFI).



Kuva 5.10 Comsol Multiphysics'n Model Builder -osion Solute Transport-Vesihöyry. Valittuna oikealla näkyy Solute Transport-Vesihöyry kohdan pääasetukset.

Osiossa Solute Transport-Vesi (kuva 5.11) oleelliset laskentaan liittyvät kohdat ovat Initial Values (alkuarvot), Free Flow (vapaa virtaus) sekä Condensation (kondensoituminen). Kuvasta 5.11 voidaan havaita, että Solute Transport-Veden asetuksista valittuna ovat ainoastaan geometrian osat 4,5 ja 8. Nämä osat ovat sisäverhouslevy, mineraalivilla sekä tuulensuojalevynä oleva kipsilevy. Muut geometrian osat, kuten ilmapuotokohdan vapaa reikä, eivät ole valinnoissa mukana, koska siellä ei voi esiintyä vapaata vettä eikä tiivistymistä voi näin tapahtua.



Kuva 5.11 Comsol Multiphysics'n Model Builder -osion Solute Transport-Vesi. Valittuna oikealla näkyy kohdan Solute Transport_Vesi pääasetukset.

Kipsilevyn ja mineraalivillan vesipitoisuuksien (kg/m^3) alkuarvot saadaan materiaalien kosteuskapasiteettifunktioista (sorptiokäyristä). Comsol Multiphysicsiin on määriteltävä parametreihin suhteellisen kosteuden alkuarvo (RH_{init}), joka on tässä työssä 80 %. Laskennan alkaessa ajanhetkellä 0 sekuntia kipsilevyn vesipitoisuus on $6,3 \text{ kg/m}^3$ ja mineraalivillan $0,98 \text{ kg/m}^3$. Tuloksista saadaan puolestaan materiaalien vesipitoisuuksien vaihtelu ajan myötä.

Mallinnusprosessissa on määriteltävä laskennan reunaehdot, jotka ovat yksi olennainen osa prosessia. Tässä työssä reunaehdoja piti määritellä jokaisen käytettävän fysiikan alle. Free and Porous Media Flow'n alla käytettiin Wall - reunaehto. Reunaehdon asetuksista valittiin, että virtausnopeudet reunoilla ovat nolla. Näin ilmavirtaukset eivät törmää mallin reunaan ja lähde takaisinpäin vaan ne vain muuttuvat nolliksi reunoilla. Aivan reunan vierellä virtausnopeudet ovat näin todenmukaisempia. Heat Transfer in Porous Media:ssa reunaehtona

käytettiin Thermal Insulation -ehtoa. Tässä ehdossa lämpövirtaa ei kulje reunojen yli lainkaan. Ehdossa määrätään, että laskenta päättyy määritettyyn reuna-ehtoon. Kolmantena reunaehtona malleissa oli No Flux. No Flux -reunaehtoa käytettiin Solute Transport fysiikoissa. Reunaehto määrittelee, että virtauksia ei mene reunan läpi, jolloin laskenta loppuu reunaan. Kosteutta ei ala näin kerääntyä mallin reunoille vääristäen tuloksia.

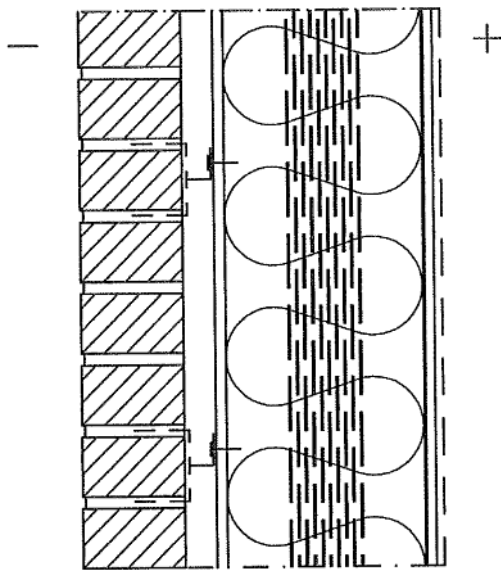
Ilmavuotojen mallintaminen Comsol Multiphysics'illä on erittäin haastavaa ja aikaa vievää. Yhden mallin tekemiseen ja tulosten visualisoimiseen käytetty aika oli noin 60 tuntia. Comsol Multiphysics soveltuu mielestäni hyvin rakennusfysiikan ongelmien ratkaisemiseen ja erilaisten tutkimusten tekoon, mutta käyttäjän on hallittava ohjelmiston käyttö. Jo pienet virheet voivat johtaa täysin väärin lopputuloksiin. Haastavuuden ja vaadittavan työmäärän takia Comsol Multiphysics tuskin tulee yleistymään rakennesuunnittelijoiden jokapäiväiseksi työkaluksi.

Yhdestä toimivasta mallista saa paljon erilaisia tuloksia. Lisäksi mallista voi muuttaa parametreja suhteellisen helposti. Helposti muokattavissa olevia parametreja ovat muun muassa ilmavuoto reiän koko, materiaalien mitat, ulko- ja sisälämpötila sekä sisä- ja ulkotilan suhteellinen kosteus. Materiaaliominaisuuksien, kuten kipsilevyn ilmanläpäisevyyden tai mineraalivillan lämmönjohtavuuden, muuttaminen käy myös nopeasti. Painesuhteita muuttaessa puolestaan on huomioitava useampia asioita mallissa, kuten käytettäviä reunaehtoja.

6 TUTKITUT RAKENTEET JA TULOKSET

6.1 Termorankaseinämallit

Toiseksi seinärakenteeksi valittiin termorankaseinä. Termorankaseinään päädyttiin, koska se on nykyään hyvin yleisesti käytetty kevyt ulkoseinärakenne. Kuvassa 6.1 näkyy leikkauspiirustus seinärakenteesta.



Kuva 6.1 Termorankaseinän rakennemalli

Seinärakenteen rakennekerrokset sisältäpäin lukien ovat seuraavat:

- pintamateriaali ja –käsittely huoneselityksen mukaan
- kipsikartonkilevy 730 kg/m^3 , 13 mm
- ilman- ja höyrynsulku 0,2 mm
- mineraalivilla 250 mm: $\lambda_d = 0,033 \text{ W/mK}$, pystyorsirunko, termoranka k 600, TC250/1.0
- tuulensuojalevy, säänkestävä Gyproc Glasroc GHU 13, 13 mm
- ilmarako, 40 mm
- julkisivumuuraus rakennusselityksen mukaan, 130 mm.

Rakenteen lämmönläpäisykerroin on $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$, eli se täyttää rakennusmääräyskokoelman velvoittaman tämän hetkisen U-arvo vaatimuksen $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Mallinnuksessa rakennemallista jätettiin kokonaan pois julkisivumuuraus, ilmaraako sekä sisäverhouslevyyn tuleva pintamateriaali ja –käsittely. Yksinkertaistukset tehtiin mallinnuksen helpottamisen vuoksi. Jokainen ylimääräinen yksityiskohta lisää työmäärää ja hankaloittaa mallin toimimista.

6.1.1 Pistemäiset reiät

Pistemäisillä rei'illä tarkoitetaan reikiä, jotka ovat muodoltaan pyöreitä. Tästä syystä reiän koko ilmoitetaan tässä työssä reiän halkaisijana. Pistemäisiä reikiä esiintyy rakennusvaipassa hyvin monesta eri syystä. Naulojen ja läpivientien tekemät reiät ovat hyvin yleisiä esimerkkejä. Tuulensuojalevyssä oleva epätiivelyskohta voi johtua esimerkiksi levyn reunan lohkeamisesta. Todellisuudessa reiät voivat olla muodoltaan muitakin kuin pyöreitä, mutta mallinnuksen selkeyttämiseksi ja helpottamiseksi reiät on mallinnettu pyöreinä pistemäisinä reikinä.

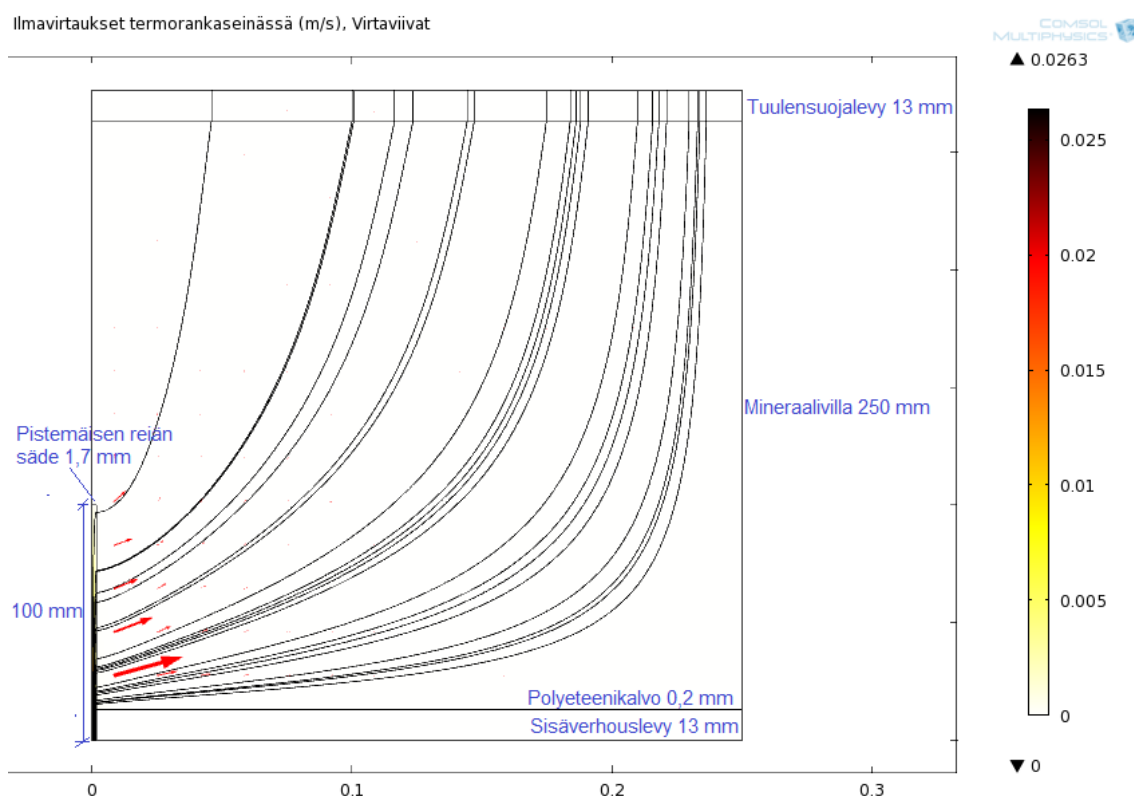
Kaikki pistemäiset reiät mallinnettiin aksiaalisymmetrisinä eli pyörähdyskappaleina. Tehdyt mallit vastaavat tapausta, jossa ulkoseinästä olisi ikään kuin otettu rasiaporalla näyte. Malleissa tutkittiin muun muassa ilmavirtauksien nopeuksia ja määriä, lämpöjakaumia, lämpövirtoja sekä kosteuden liikkeitä ja määriä. Osa malleista tehtiin ajasta riippuvaisina ja osa jatkuvuustilan tarkasteluina. Ajasta riippuvat mallit vievät paljon tietokoneen muistikapasiteettia ja ovat näin hyvin raskaita tietokoneelle. Lisäksi ohjelmalla voi mennä tulosten laskentaan useita päiviä.

Ensimmäinen hyvin yksinkertainen tapaus (taulukko 6.1) on neljän tuuman naulan tekemä reikä. Naulan paksuus on 3,4 mm, jolloin pistemäisen reiän halkaisija on 3,4 mm. Reiät ovat sisäverhouslevyissä, polyeteenikalvossa sekä 86,8 mm:n matkalla mineraalivillassa. Paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli on 3 Pa. Tuulensuojalevy on Gyproc Glasroc GHU, jossa ei ole reikää. Gyproc Glasroc GHU -tuulensuojalevyn ilmanläpäisevyys on $2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{msPa}$ ja se on nykyi-

sin hyvin yleisesti käytetty tuulensuojatuote. Suurimmat ilman virtausnopeudet ovat noin 26 mm/s ja ne esiintyvät sisäverhouslevyn ja polyeteenikalvon kohdalla reiän keskellä. Kuvassa 6.2 näkyy koko seinärakenteen virtauskenttä.

Taulukko 6.1. Neljän tuuman naulan tekemä reikä.

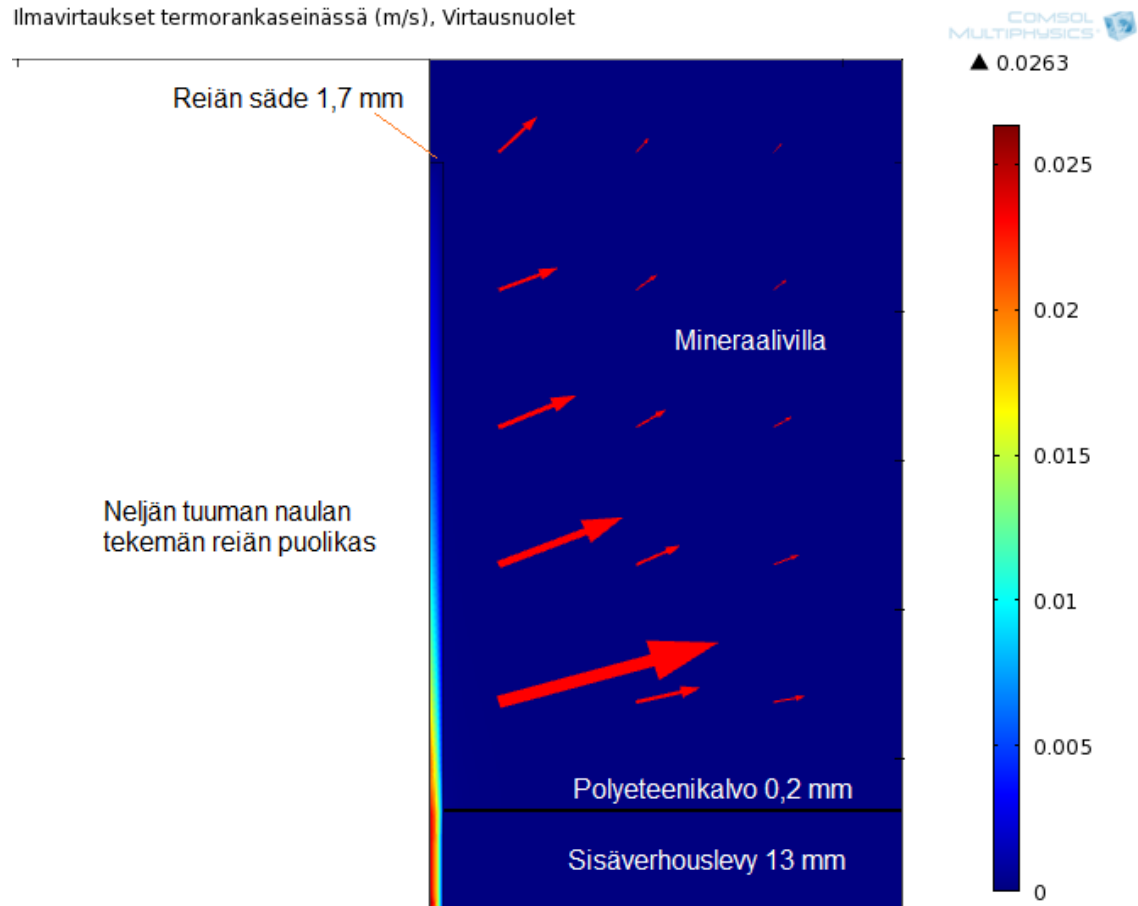
Parametri	Arvo
Reiän syvyys sisältäpäin	100 mm
Reiän halkaisija	3,4 mm
Paine-ero	3 Pa ylipaine
Tuulensuojalevyn ilmanläpäisevyys	$2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{msPa}$



Kuva 6.2 Ilmavirtaukset (m/s) seinärakenteessa, jossa on neljän tuuman naulan tekemä reikä. Kuvassa näkyvä rakenne on pyörähdysymmetrisen mallin puolikas.

Kuvan 6.2 vasemmassa alareunassa näkyy puolet naulan tekemästä reiästä. Punaiset nuolet ja mustat virtausviivat kuvaavat ilmavirtausten leviämissuuntia.

Seuraavassa kuvassa 6.3 on tarkennos naulan tekemän reiän alueelta. Kuvasta 6.3 voidaan havaita, miten ilmavirtaukset jakaantuvat pienessä pistemäisessä reiässä, kun reikä ei mene koko rakenteen läpi.



Kuva 6.3 Ilmavirtaukset (m/s) neljän tuuman naulan tekemän reiän alueella.

Suurimmat ilmavirtaukset esiintyvät reiän keskellä. Muualla kuin reiän alueella ilmavirtaukset ovat olemattomia. Punaiset virtausnuolet osoittavat, miten ilmavirtaukset lähtevät leviämään rakenteeseen.

Ilman virtausnopeuksiin vaikuttaa tässä mallissa oleellisesti käytettävä tuulensuojatuote. Käytettäessä normaalia kipsilevyä tuulensuojalevynä, jonka ilmanläpäisevyys on noin $1,8 \times 10^{-10} \text{ m}^3/\text{msPa}$, laskevat suurimmat virtausnopeudet arvoon 1,9 mm/s. Suomen Kuitulevy Oy:n Tuulileijona tuotteella suurimmat virtausnopeudet mallissa ovat 12,7 mm/s. Tuulileijonan paksuus on 12 mm ja ilmanläpäisevyyden arvo $1,2 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{msPa}$.

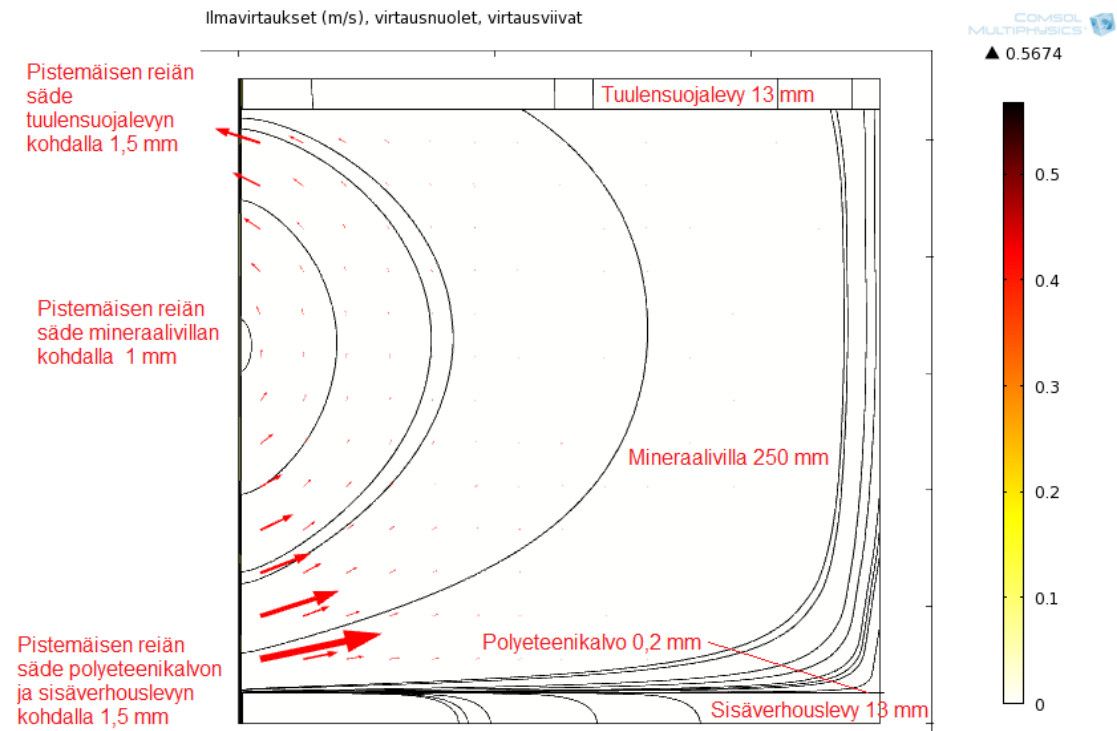
Tuloksista voidaan päätellä, että ilman virtausnopeuksiin vaikuttaa tässä mallissa eniten tuulensuojalevyn ilmanläpäisevyys. Tuulensuojalevyiksi suunnitellut tuotteet Gyproc Glasroc GHU ja Tuulileijona päästävät huomattavasti enemmän ilmaa lävitseen kuin normaali kipsilevy. Ilmavuototilanteiden kannalta normaali kipsilevy on Gyproc Glasroc GHU:ta ja Tuulileijonaa parempi vaihtoehto tuulensuojalevyksi. Asia ei ole kuitenkaan niin yksinkertainen, koska tuulensuojalevyltä vaaditaan paljon muutakin kuin hyvää ilmatiiveyttä. Tärkeämmässä roolissa on esimerkiksi tuotteen kyky kestää kosteusrasitusta jokaisena vuodenaikana sekä päästää kosteuden diffuusiovirtaukset ulos.

Seuraavassa aksiaalisymmetrisessä termorankaseinämallissa (taulukko 6.2) on ilmavuototilanne, jossa pistemäinen reikä menee läpi koko rakenteen. Todellisuudessa tapaus on harvinaisempi, mutta tuloksien avulla voidaan arvioida hyvin yksittäisen reiän vaikutusta vaipan lämpötalouteen ja kosteusrasitukseen. Malli sisältää ilmavirtaukset, lämmönsiirtymisen sekä kosteuden faasimuutokseen. Reiän halkaisija sisäverhouslevyn, polyeteenikalvon ja tuulensuojalevyn kohdalla on 3 mm. Mineraalivillan kohdalla reiän halkaisija on 2 mm. Tässä mallissa sisäpuolelle on asetettu vakiona pysyvä 3:n Pascalin ylipaine. Malli on ajastariippuvainen ja siihen on tuotu koko marraskuun ulkolämpötilan ja ulkotilan suhteellisen kosteuden tiedot. Sää tiedot on otettu ympäristöministeriön julkaisemasta lausunta versiosta Suomen sää tiedoista. (Sää tiedot) Sisälämpötila on +21 °C ja sisätilan suhteellinen kosteus 40 %.

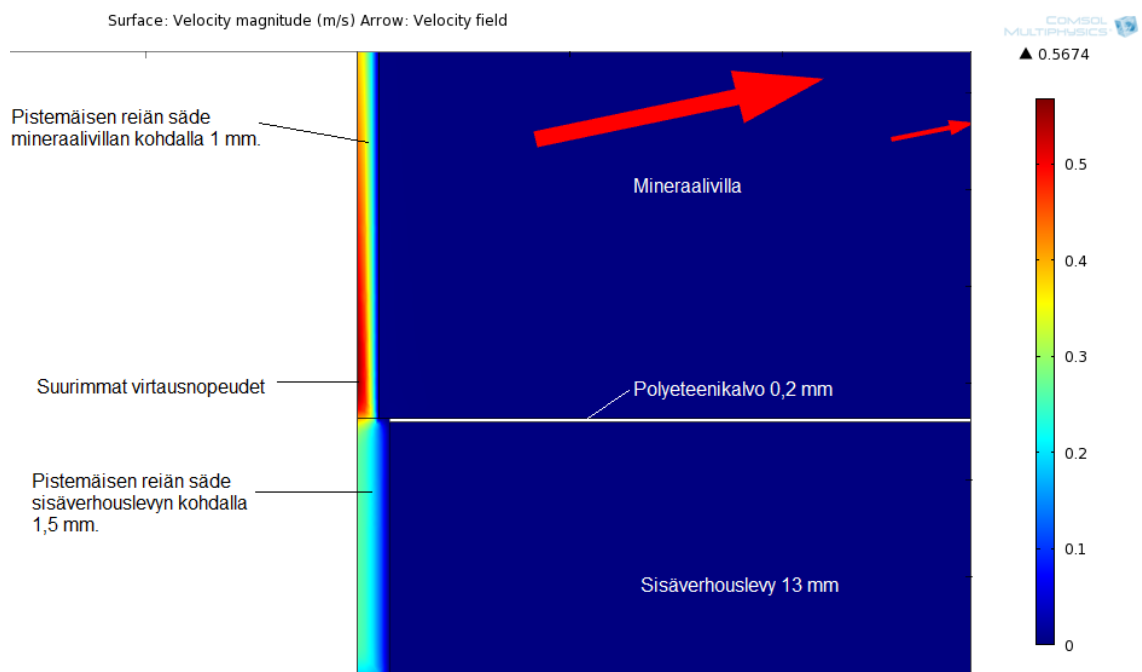
Taulukko 6.2. Läpi menevä pistemäinen reikä termorankaseinässä.

Parametri	Arvo
Reiän syvyys	Läpi rakenteen
Reiän halkaisija	Mineraalivillan kohdalla 2 mm, muualla 3 mm
Paine-ero	3 Pa ylipaine
Tuulensuojalevyn ilmanläpisevyys	$2,5 \times 10^{-9} \text{ m}^3/\text{msPa}$
Tarkasteltava ajanjakso	Marraskuu
Sisälämpötila	Vakio +21 °C
Sisätilan suhteellinen kosteus	Vakio 40 %

Kuvassa 6.4 on mallin virtauskenttä, jossa suurimmat virtausnopeudet ovat 567 mm/s. Suurimmat virtausnopeudet ovat reiän keskellä polyeteenikalvon kohdalla (kuva 6.5). Ilmavirtaukset pakkautuvat polyeteenikalvon reiän kohdalle, koska polyeteenikalvo ei päästä ilmaa lävitseen. Polyeteenikalvon kohdalla oleva reikä on ainut reitti, josta ilma pääsee virtaamaan rakenteeseen ja sitä kautta ulos. Mineraalivillan reiän kohdalla osa ilmavirtauksista leviää huokoiseen mineraalivillaan, jonka takia mineraalivillan reiän kohdalla olevat virtausnopeudet pienenevät.



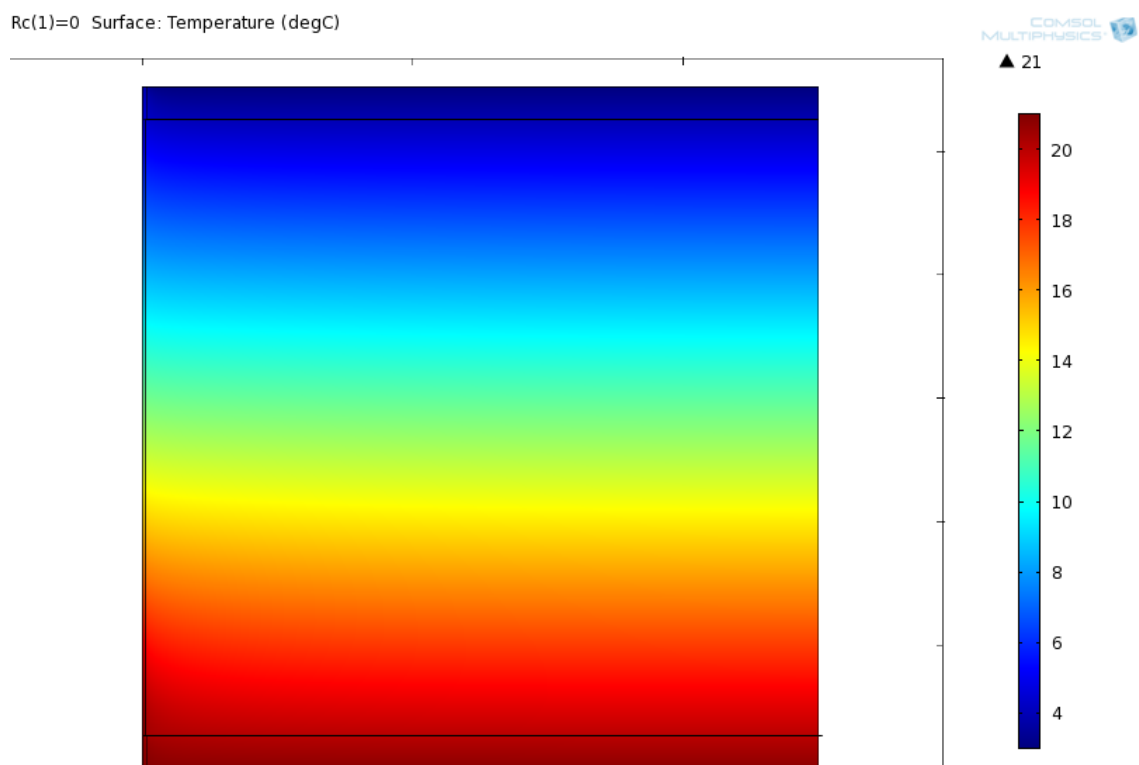
Kuva 6.4 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin virtauskenttä (m/s) paine-eron ollessa 3 Pa.



Kuva 6.5 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin virtauskentästä otettu tarkennos suurimpien virtausnopeusten alueelta.

Comsol Multiphysics ohjelmiston avulla laskettu virtaava ilmamäärä reiän läpi on $0,0031 \text{ m}^3/\text{h}$ eli noin 75 l/vrk . Sisälämpötilassa $+21 \text{ }^\circ\text{C}$ on maksimikosteus $18,31 \text{ g/m}^3$. Sisätilan suhteellisen kosteuden ollessa 40% on ilman vesihöyrypitoisuus sisällä $0,4 \cdot 18,31 \text{ g/m}^3 = 7,32 \text{ g/m}^3$. Vuorokaudessa reiän läpi virtaa kosteutta noin $0,0031 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 24 \text{ h/vrk} \cdot 7,32 \text{ g/m}^3 = 0,54 \text{ g/vrk}$. Reiän läpi virtaava kosteus määrä tässä mallissa vuoden aikana on noin 200 g .

Rakennemallin lämpötilajakauma jatkuvuustilassa on esitetty kuvassa 6.6. Kuvasta 6.6 voidaan havaita, että vasemmassa reunassa heikosti näkyvä reikä lämmittää vieressään olevia rakenteita. Reiän läheisyydessä oleva mineraalivila on $1 - 2 \text{ }^\circ\text{C}$ lämpimämpää kuin reiän vastaisella puolella oleva mineraalivila. Ylipaineen takia lämmin sisäilma virtaa reiästä ulospäin ja lämmittää matkalla vieressään olevia materiaaleja.

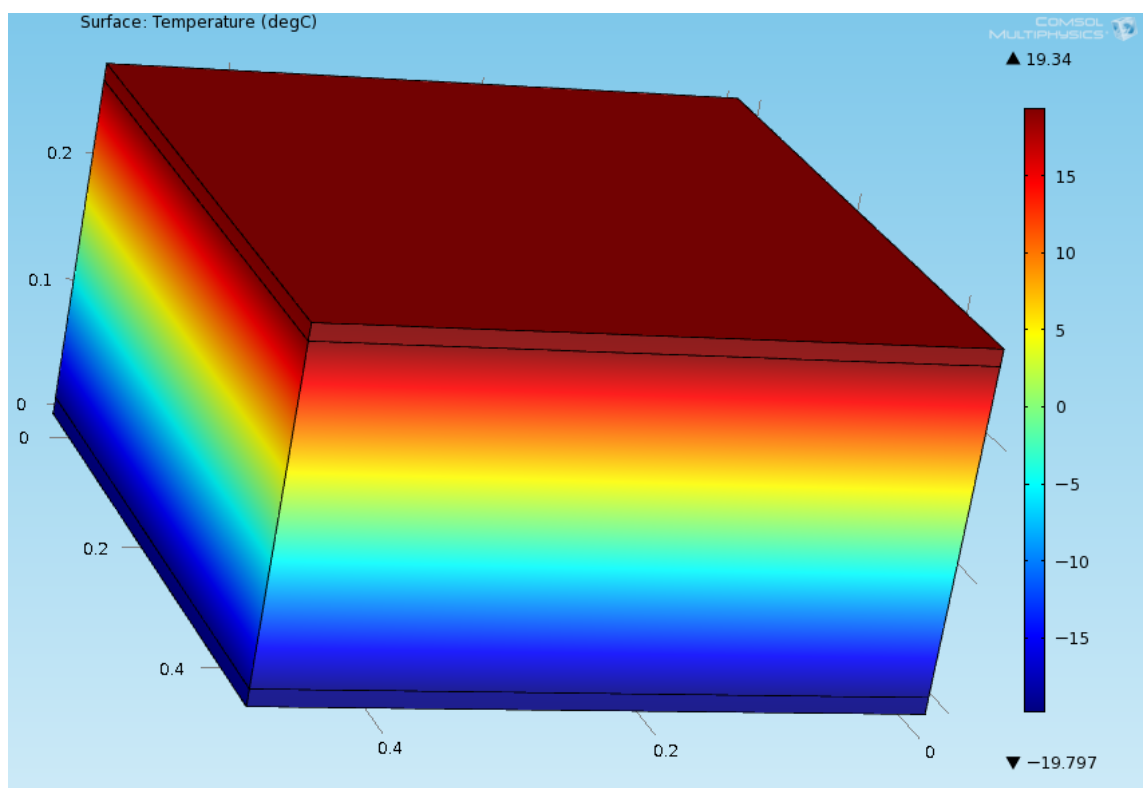


Kuva 6.6 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin lämpötilajakauma jatkuvuustilassa ulkolämpötilalla $+2,9 \text{ }^\circ\text{C}$.

Comsol Multiphysics -ohjelmiston avulla on mahdollista laskea rakenteen läpi siirtyvä lämpövirta ja sen avulla voidaan määritellä rakenteelle U-arvo. Ilma- vuodollisen rakenteen U-arvoa voidaan verrata vastaavaan ehjään rakenteeseen. Vertailun avulla päästään perille ilmavuodon vaikutuksesta vaipparaken-

teen lämpötalouteen. U-arvon voi laskea rakenteen sisä- tai ulkokuoren pintojen suhteen. Laskettu U-arvo ulkokuoren pintojen suhteen on $0,161 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja sisäpintojen suhteen $0,148 \text{ W/m}^2\text{K}$. Elementtimenetelmässä käytetään diskretisointia, jossa kenttäfunktion äärettömän monen tuntemattoman arvon sijasta lasketaan sen solmuarvoja, joita on äärellinen määrä. Ero tuloksissa johtuu tästä elementtimenetelmän diskretisoinnista. Interpoloimalla tulokset saadaan U-arvoksi $0,155 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Kuvassa 6.7 näkyy vertailumallina olevan ehjän termorankaseinän lämpötilajakauma.

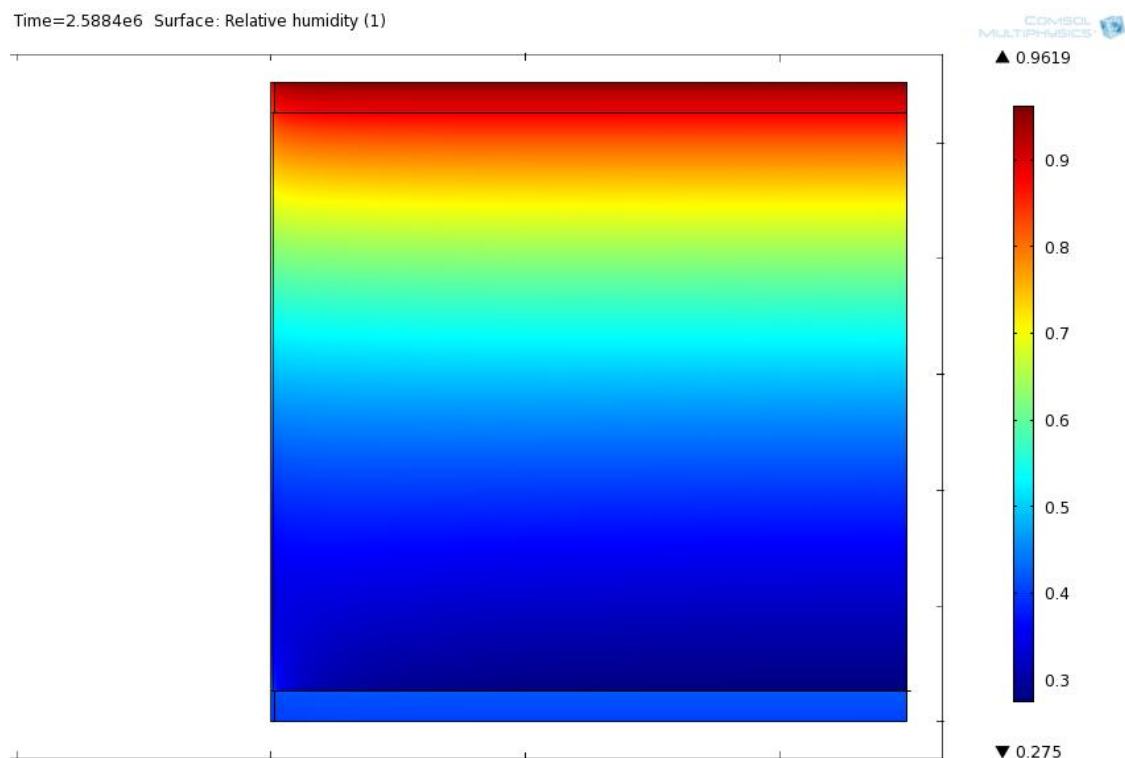


Kuva 6.7 Comsol Multiphysics'illä tehdyn vertailumallin lämpötilajakauma ehjästä termorankaseinästä, jossa sisälämpötila $+20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ja ulkolämpötila $-20 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ehjän termorankaseinän Comsol Multiphysics'illä laskettu U-arvo on $0,127 \text{ W/m}^2\text{K}$. Tuloksessa on huomioitava, että rakenteen U-arvo on laskettu ilman termorankoja, jotta tulos olisi vertailukelpoinen ilmavuotomalleihin. Tässä mallissa oleva pistemäinen reikä nostaa U-arvoa 18 %, joka on huomattava lisäys rakennusvaipan energiankulutuksen suhteen. Jos ulkovaipassa olisi jokaisella

neliöllä tällainen pistemäinen reikä, nousisi rakennusvaipan energiankulutus noin 18 %.

Ajasta riippuvasta mallista saadaan rakenteen suhteellinen kosteuspitoisuus määritettyä (kuva 6.8). Mallin ratkaisijan asetuksia määritettäessä on päätettävä ajanhetket, joina ohjelmisto ottaa tulokset talteen. Kuvan 6.8 suhteellinen kosteuspitoisuus on otettu viimeisestä tallennetusta ajanhetkestä eli marraskuun lopulta. Tarkasteltaessa rakenteen suhteellisia kosteuspitoisuuksia eri ajanhetkinä marraskuussa huomiona oli, että kosteus alkaa kerääntyä tuulensuojalevyn sisäpintaan. Suurimmat suhteellisen kosteuden arvot olivat noin 97 % ja ne olivat aivan tuulensuojalevyn ulkopinnassa.



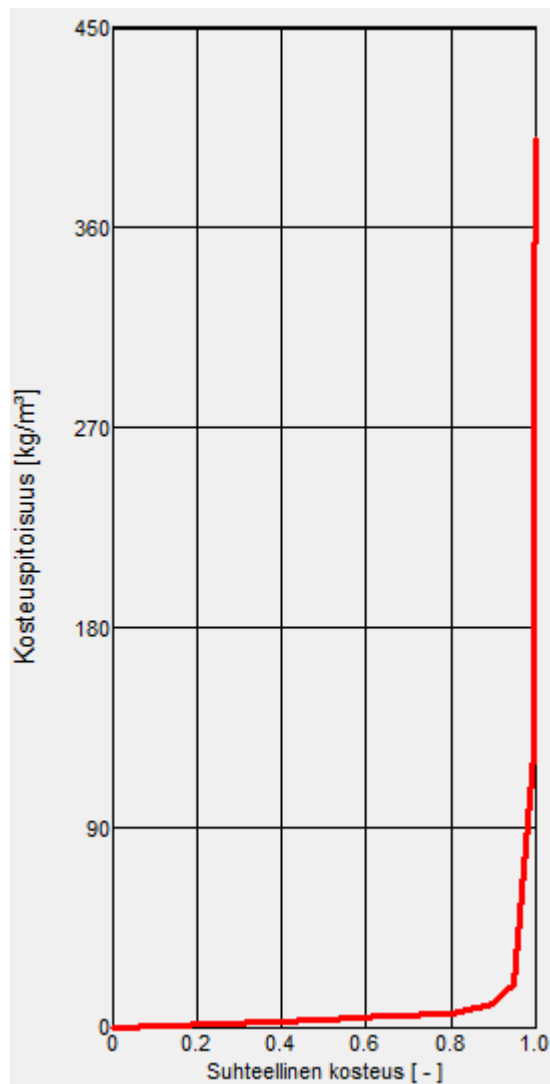
Kuva 6.8 Comsol Multiphysics’illä tehdyn termorankaseinämallin suhteellisen kosteuden jakauma rakenteessa marraskuun lopusta.

Tarkasteltaessa kosteuden kertymistä rakenteeseen voidaan tarkastella eri rakennenosissa olevia vesipitoisuuksia laskennassa määriteltävinä ajanhetkinä. Taulukosta 6.3 selviää tämän mallin tuulensuojalevynä käytettävän kipsilevyn vesipitoisuudet marraskuussa eri ajanhetkillä. Taulukkoon 6.3 on myös sisällytetty kyseisen ajanhetken ulkotilan suhteellinen kosteus.

Taulukko 6.3. Termorankaseinän tuulensuojalevyn simuloidut vesipitoisuudet marraskuussa eri ajanhetkinä.

Marraskuun ajanhetki [vrk]	Ulkoilman suhteellinen kosteus kyseisellä ajanhetkellä [%]	Tuulensuojalevyn vesipitoisuus [kg/m ³]
0	100	6,3
0,4	95	9,3
2,9	97	13,7
5,4	90	14,8
10,4	90	15,7
14,2	93	14,5
17,9	87	14,5
20,4	85	9
24,2	87	9,1
27,9	89	10,6
30	100	14,5

Taulukosta 6.3 voidaan havaita, että ensimmäisellä ajanhetkellä vesipitoisuudeksi on saatu laskennassa 6,30 kg/m³. Laskennassa on käytetty kaikkien materiaalien alkutilan suhteellisia kosteuksina arvoa 80 %. Tuloksen oikeellisuus voidaan näin tarkistaa kipsilevyn sorptiokäyrästä (kuva 6.9), jossa 80 %:n kohdalla on arvo 6,30 kg/m³. Tuulensuojalevyn vesipitoisuudet vaihtelevat 6,30 - 15,70 kg/m³ välillä, jotka vastaavat suhteellisen kosteuden arvoja 80 - 92 %.



Kuva 6.9 Kipsilevyn sorptiokäyrä (käyrässä on mukana hygroskooppinen sekä kapillaarinen alue). (WUFI.)

Tämän mallin sisäverhouslevyn vesipitoisuus on alussa $6,30 \text{ kg/m}^3$, joka vastaa sorptiokäyrän kyseistä arvoa suhteellisen kosteuden ollessa 80 %. Vesipitoisuus laskee alle kahdessa vuorokaudessa arvoon $3,00 \text{ kg/m}^3$, jonka lähellä vesipitoisuus pysyy koko loppu kuukauden. Tuloksesta voidaan päätellä, että sisäverhouslevyn vesipitoisuus vastaa sorptiokäyrän suhteellisen kosteuden arvoa 40 %. Päätelmä johtaa siihen, että sisäverhouslevyn suhteellinen kosteus on sama kuin sisätilan suhteellinen kosteus tässä mallissa, 40 %.

Mineraalivillan vesipitoisuus mallissa on alussa $0,98 \text{ kg/m}^3$. Noin 4 vuorokauden kuluessa vesipitoisuus laskee $0,70 \text{ kg/m}^3$. Loppu marraskuun mineraalivillan vesipitoisuus vaihtelee $0,50 - 0,70 \text{ kg/m}^3$ välillä. Arvot vastaavat suhteellisen

kosteuden arvoja 52 - 68 %. Täysin kyllästyneen mineraalivillan vesipitoisuus olisi $3,00 \text{ kg/m}^3$ tässä työssä. Tästä arvosta ollaan hyvin kaukana yhden kuukauden tarkastelujaksoa analysoidessa.

6.1.2 Viivamaiset reiät

Viivamainen reikä on hyvin tyypillinen ilmavuodon muoto kevyissä ulkoseinissä, kuten esimerkiksi termorankaseinässä. Viivamaisella reiällä tarkoitetaan reikää, joka on muodoltaan hyvin ohut, mutta pituussuunnassa se voi olla esimerkiksi metrin pituinen. Viivamaisia reikiä voi esiintyä esimerkiksi seinien nurkissa tai sisäverhouslevyjen saumojen kohdalla. Polyeteenikalvoon viivamainen reikä voi tulla esimerkiksi mattopuukon viillosta tai kalvojen sauman kohdalle.

Kaikki viivamaiset reiät mallinnettiin 2D-malleina. Näissä malleissa tutkittiin muun muassa ilmavirtauksien nopeuksia eri tyyppisissä rei'issä. Osassa malleista reiät ovat samassa linjassa, osassa taas epäkeskeisesti, jolloin saadaan selville, miten reikien sijainti toisiinsa nähden vaikuttaa ilmavirtauksien nopeuksiin. Virtausnopeuksiin vaikuttaa olennaisesti myös mineraalivillan ilmanläpäisevyys. Näin päädyttiin tutkimaan virtausnopeuksia mineraalivillan eri ilmanläpäisevyyksien arvoilla.

Ilmanläpäisevyyden yksikkö voidaan määritellä kahdella eri tavalla, joko m^3/msPa tai m^2 . Comsolissa yksikkönä on käytettävä m^2 . Villavalmistajat puolestaan ilmoittavat mineraalivillojen ilmanläpäisevyyden yksikkönä m^3/msPa . Yksikkömuunnos suoritetaan kaavan 6.1 avulla. (RIL 225-2004.)

$$L = \frac{k}{\eta}, \quad (6.1)$$

jossa

L = ilmanläpäisevyys [m^3/msPa]

k = huokoisen aineen permeabiliteetti ilman suhteen [m^2]

η = ilman dynaaminen viskositeetti vakiolämpötilassa [Ns/m^2]

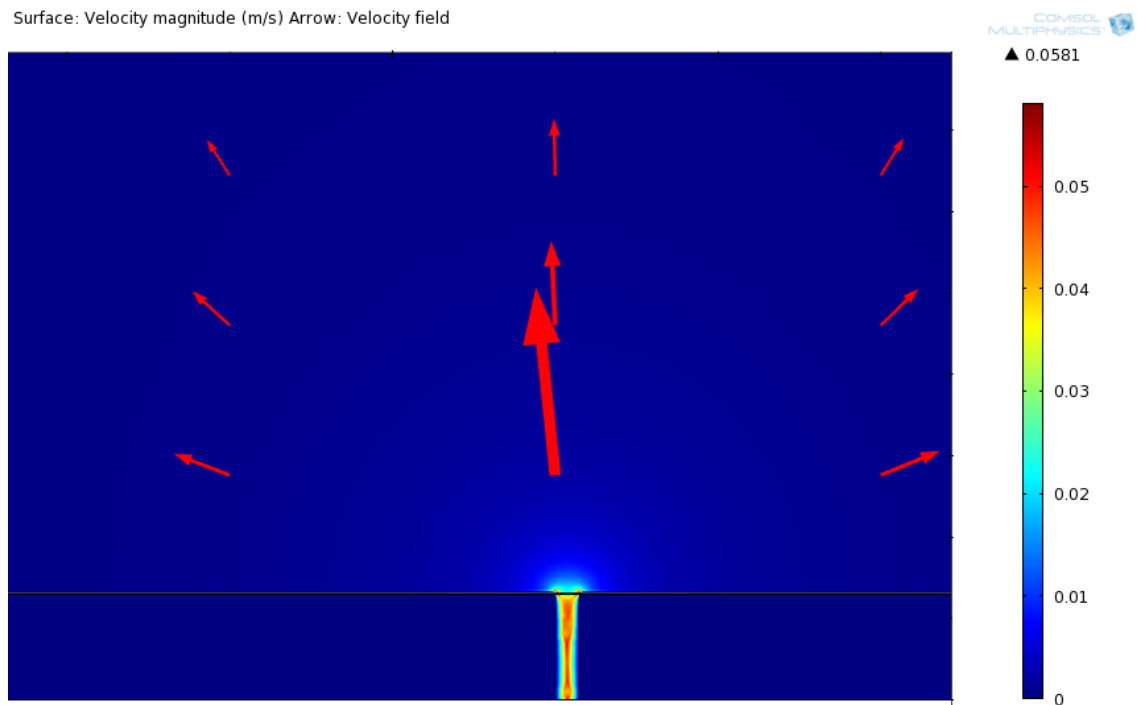
$\eta = [17 + (0,05 \times \delta)] \times 10^{-6}$, jossa δ on ilman lämpötila [$^{\circ}\text{C}$]

Ensimmäinen yksinkertainen tapaus on 2D-malli (taulukko 6.4), jossa viivamaiset reiät ovat samassa linjassa. Reikien leveydet ovat 3 mm. Tässä mallissa mineraalivilla menee ehjänä rakenteen läpi. Reiät ovat sisäverhouslevyssä, polyeteenikalvossa sekä tuulensuojalevyssä. Mineraalivillan ilmanläpäisevyytenä on käytetty arvoa $120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$. Esimerkiksi Isoverin KL-37 ja Parocin eXtra -mineraalivilloilla on kyseinen ilmanläpäisevyyden arvo. Virtausnopeuksiin vaikuttaa olennaisesti myös paine-ero rakenteen yli. Tässä mallissa sisäpuolelle on asetettu 3 Pa:n ylipaine.

Taulukko 6.4. Termorankaseinä, jossa on viivamainen reikä.

Parametri	Arvo
Reikien leveydet	3 mm sisäverhouslevyn, polyeteenikalvon ja tuulensuojalevyn kohdalla. Mineraalivilla ehjä.
Paine-ero	3 Pa ylipaine
Mineraalivillan ilmanläpäisevyys	$120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$, (Isover KL37, Parox eXtra)

Suurimmat virtausnopeudet ovat luokkaa 58 mm/s sisäverhouslevyn ja tuulensuojalevyn reikien kohdalla. Kuvassa 6.10 näkyy kyseisestä mallista otettu kuva ilmavirtauksista. Kuva 6.10 on tarkennos sisäverhouslevyn reiän kohdalta. Siitä voi hahmottaa, miten ilmavirtaukset lähtevät leviämään huokoiseen mineraalivillan. Villan alueella virtausnopeudet ovat suurimmillaan sisäpuolen sekä ulkopuolen reikien rajapinnassa, noin 10 mm/s. Rakenteen keskellä virtausnopeudet laskevat alle 1 mm/s.



Kuva 6.10 Virtausnopeudet (m/s) sisäverhouslevyn reiän kohdalla.

Seuraavassa taulukossa 6.5 näkyvät suurimmat ilman virtausnopeudet eri mineraalivillojen ilmanläpäisevyysarvoilla. Taulukosta voi hahmottaa, miten voimakkaasti mineraalivillan ilmanläpäisevyys vaikuttaa virtausnopeuksiin viivamaisessa reiässä termorankaseinässä. Paine-ero rakenteen yli on 3 Pa ja reiän halkaisijat 3 mm. Reiät ovat sisäverhouslevyssä, polyteenikalvossa sekä tuulensuojalevyssä. Mineraalivilla menee ehjänä koko rakenteen läpi.

Taulukko 6.5 Reiän läpi virtaavan ilman virtausnopeudet (m/s) eri mineraalivillojen ilmanläpäisevyyksillä.

Esimerkkituote	Ilmanläpäisevyys [x10 ⁻⁶ m ³ /msPa]	Suurimmat virtausnopeudet [mm/s]
-	7,64	4,7
Paroc WAS 25t ja 25tj	25	14,6
Isover KL-32	50	27,5
eXtra Plus	100	50
Isover KL-37 ja Paroc eXtra	120	58,1
Isover KL-40	180	81,5
-	250	111,7

Mineraalivillan ilmanläpäisevyys ominaisuudet päätettiin selvittää Parocin sekä Isoverin tuotteista. Ilmanläpäisevyydeltään parhaat ominaisuudet ovat Parocin WAS 25t ja 25tj:llä. Tuotteet ovat muuten identtiset, mutta WAS 25 tj:ssä on ponttirakenne. WAS 25t ja 25tj ovat aiemmin täyttäneet tuulensuojalevyn vaatimukset. Nykyään tuotteiden käytölle ulkoseinärakenteissa on oltava jokin erityinen syy. Paroc eXtra ja eXtra Plus ovat yleisimpiä kevyiden ulkoseinien kimmoisia lämmöneristeitä. Paroc eXtran käyttöä lisää tuotteen laaja mittavalikoima verrattuna eXtra Plussaan. Paroc eXtra Plussan lämmöneristävyys on Paroc eXtraa parempi. Lisäksi eXtra Plussan ilmanläpäisevyys on hieman eXtraa parempi, minkä takia suurimmat virtausnopeudet tässä mallissa ovat noin 20 % eXtraa alhaisemmat.

Isoverin tuoteperheen heikoin ilmanläpäisevyyden arvo on KL-40 mineraalivillalla. KL-40 on enimmäkseen ääneneristykseen käytetty tuote. Muissa tapauksissa tuotteen käytölle on oltava jokin erityinen peruste. Suomessa KL-40 tuotetta ei ole saatavissa juuri lainkaan. Kevyisiin ulkoseiniin käytetään enimmäkseen tuotteita KL-37 ja KL-32. Isover KL-32 ilmanläpäisevyyden arvo on yli kaksi kertaa parempi kuin KL-37:n. Tästä syystä suurimmat virtausnopeudetkin ovat Isover KL-32:ssa huomattavasti pienempiä.

Taulukossa 6.6 on analysoitu virtaavan ilman määriä sekä virtaavan kosteuden määriä. Tapaus on täysin identtinen yllä olevan mallin kanssa. Yksinkertaistuksena sisätilan suhteellinen kosteus ja lämpötila on asetettu vakioksi. Sisätilan lämpötila on 21 astetta ja sisätilan suhteellinen kosteus 40 %. Kyllästysvesihöyrypitoisuus 21 asteen lämpötilassa on $18,31 \text{ g/m}^3$. Tästä johtuen ilman vesihöyrypitoisuus sisällä on $0,4 \cdot 18,31 \text{ g/m}^3 = 7,32 \text{ g/m}^3$.

Taulukko 6.6. Reiän läpi virtaavan ilman määrät (l/h) metrin pituisessa viivamaisessa reiässä sekä reiän läpi virtaavan kosteuden määrät (g/vrk) metrin pituisessa viivamaisessa reiässä eri mineraalivillojen ilmanläpäisevyyksillä.

Esimerkkituote	Ilmanläpäisevyys [$\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$]	Virtaavan ilman määrä [l/h]	Virtaavan kosteuden määrä [g/vrk]
-	7,64	18,3	3,2
Paroc WAS 25t ja 25j	25	59,9	10,5
Isover KL-32	50	116,6	20,5
Paroc eXtra Plus	100	226	39,7
Isover KL-37 ja Paroc eXtra	120	267,8	47,1
Isover KL-40	180	386,4	67,9
-	250	513,2	90,2

Simuloidusta mallista saa ratkaistua virtaavan ilman määrän. Verrattaessa esimerkiksi Isover KL-32 mineraalivillaa Isover KL-37:ään tai Paroc eXtra:an on ero noin 2,3-kertainen. Virtaavan ilman määrän voi tarkistaa myös käsin laske-
malla olettaen, että simulaatiossa on ilman virtausnopeudet oikein. Simuloinnin tuloksista voi arvioida keskimääräisen virtausnopeuden reiän läpi. Tuloksien perusteella esimerkiksi Isover KL-32 mineraalivillaa käytettäessä on keskimääräinen virtausnopeus reiässä luokkaa 10 mm/s. Tuloksen perusteella voidaan laskea virtaavan ilman määrä (l/h) metrin pituisessa viivamaisessa reiässä. Kun keskimääräinen virtausnopeus kerrotaan reiän pinta-alalla, ja tulos kerrotaan 3600:lla (s/h) ja tämän tulos kerrotaan edelleen 1000 (l/m^3), saadaan virtaavan ilman määrä (l/h) metrin pituisessa viivamaisessa reiässä. Seuraavassa laskutoimitus:

$$0,01 \text{ m/s} \cdot 0,003 \text{ m} \cdot 1,0 \text{ m} \cdot 3600 \text{ s/h} \cdot 1000 \text{ l/m}^3 = 108 \text{ l/h}$$

Comsolin laskema tarkka tulos on 116,6 l/h joka on likimain sama kuin käsin laskettu tulos. Ohjelman laskemiin ilmamääriin voidaan siis luottaa tämän tapauksen osalta olettaen, että ohjelma on laskenut virtausnopeudet oikein.

Reikien läpi virtaavien kosteuksien määrät voidaan laskea helposti myös käsin, kun tunnetaan virtaavan ilman määrät sekä ilman vesihöyrypitoisuus sisällä. Virtaavan ilman määrä Isover KL-32 mineraalivillassa oli 116,6 l/h. Virtaavan kosteuden määrä kyseiselle mineraalivillalle voidaan laskea seuraavalla tavalla:

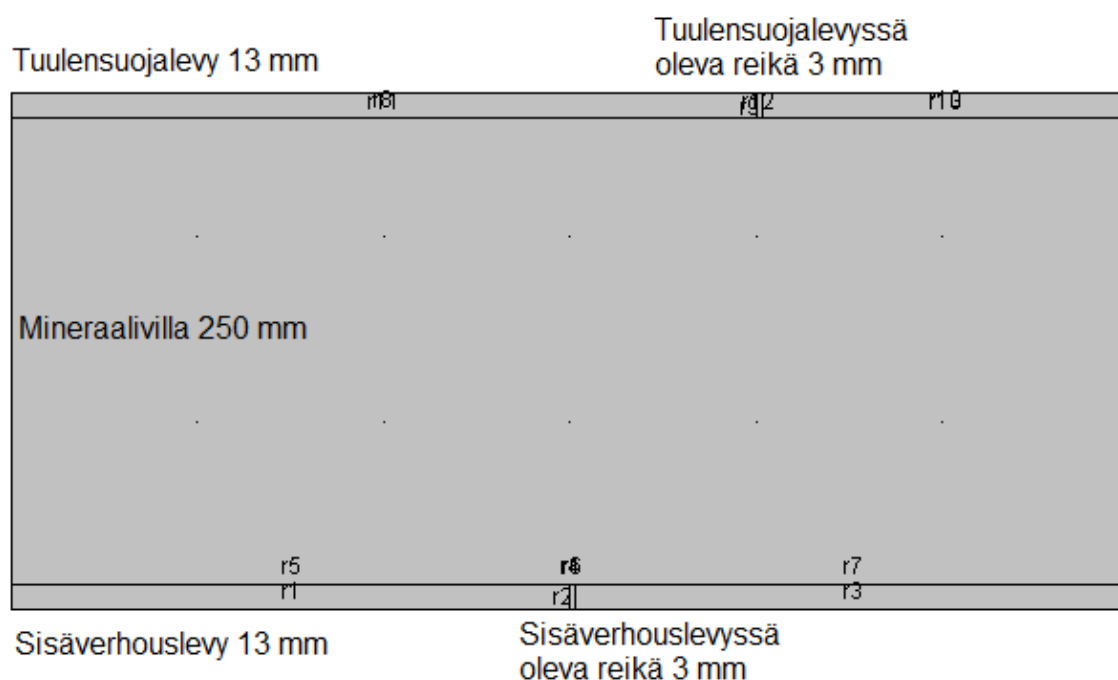
$$\frac{116,6 \text{ l/h} \cdot 24 \text{ h/vrk}}{1000 \text{ l/m}^3} \cdot 7,32 \text{ g/m}^3 = 20,48 \text{ g/vrk}$$

Tulokset virtaavien kosteuksien määristä eroavat oleellisesti toisistaan. Isover KL-37:n sekä Paroc eXtra:n kosteusmäärät ovat 47,1 g/vrk. Tuloksista voidaan päätellä, että käytettäessä mineraalivillaa Isover KL-32 on virtaavan kosteuden määrät noin 2,4 kertaa pienemmät, kuin mineraalivilloilla Isover KL-37 ja Paroc eXtra.

Mineraalivillojen eri ilmanläpäisevyyksien vaikutusten lisäksi viivamaisissa 2D - malleissa tutkittiin eri linjassa olevien reikien vaikutusta ilman virtausnopeuksiin. Ensimmäinen epäkeskeisen termorankaseinämallin (taulukko 6.7) reikien vaakasuuntainen etäisyys toisistaan reiän keskeltä keskelle on 100 mm. Reikien leveydet ovat 3 mm sekä paine-ero rakenteen yli 3 Pa. Reiät ovat sisäverhouslevyssä, polyeteenikalvossa sekä tuulensuojalevyssä. Mineraalivilla menee ehjänä koko rakenteen läpi. Mineraalivillan ilmanläpäisevyytenä on käytetty arvoa $120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$. Kyseinen ilmanläpäisevyyden arvo on esimerkiksi Isoverin KL-37- sekä Parocin eXtra -mineraalivilloilla. Kuvassa 6.11 näkyy 2D - termorankaseinämallin geometria, jossa reiät ovat eri linjassa.

Taulukko 6.7. 2D -termorankaseinämalli, jossa viivamaiset reiät ovat epäkeskeisesti 100 mm.

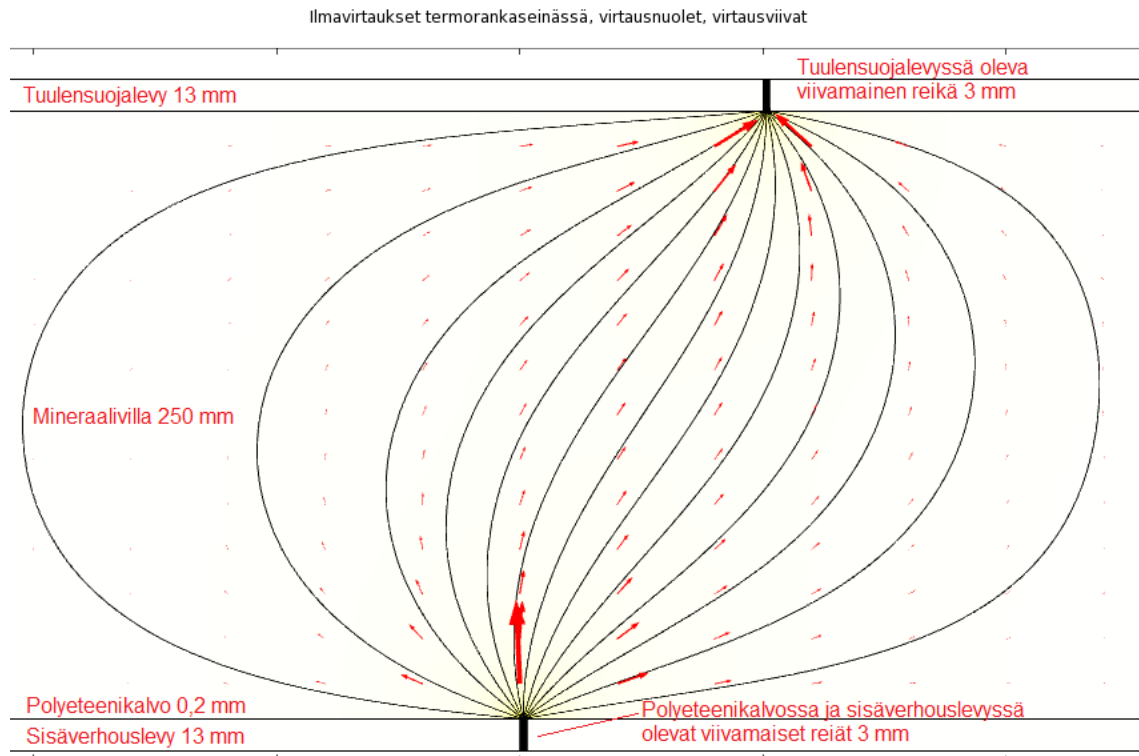
Parametri	Arvo
Reikien leveydet	3 mm sisäverhouslevyn, polyeteenikalvon ja tuulensuojalevyn kohdalla. Mineraalivilla ehjä.
Paine-ero	3 Pa ylipaine
Mineraalivillan ilmanläpäisevyys	$120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$, (Isover KL37, Parox eXtra)
Reikien epäkeskeisyys	100 mm reiän keskeltä keskelle.



Kuva 6.11 Comsolissa tehty geometria mallista, jossa viivamaiset reiät epäkeskeisesti. Kuvassa ilmenevät r1,r2,r3 jne ovat ohjelman itse tekemiä selventäviä numerointeja geometriasta.

Suurimmat virtausnopeudet olivat 56,0 mm/s sisäverhouslevyn sekä tuulensuojalevyn reikien keskellä. Aiemmassa tapauksessa (taulukko 6.4) viivamaiset reiät olivat samassa linjassa, jolloin suurimmat virtausnopeudet olivat 58,1 mm/s. Reikien vaakasuuntaisen etäisyyden ollessa 100 mm on ero virtausnopeuksissa noin 4 %. Todellisuudessa eri rakennusvirheistä johtuvat reiät sisä-

verhouslevyissä ja tuulensuojalevyissä sattuvat harvoin samaan kohtaan. Reiki-
en ollessa noin 100 mm epäkeskeisesti ulkoseinässä pysyvät virtausnopeudet
silti lähes samoina kuin, jos ne olisivat täysin samassa linjassa. Tämä johtuu
mineraalivillan korkeasta ilmanläpäisevyydestä, jonka takia ilma pääsee virtaa-
maan sisemmästä reiästä vinosti kohti ulompaa reikää. Kuvassa 6.12 näkyy
ilman liikkeet seinärakenteessa punaisina virtausnuolina ja virtausviivoina.



Kuva 6.12 Ilmavirtaukset termorankaseinässä viivamaisten reikiä ollessa epäkeskeisesti 100 mm.

Kuvasta 6.12 voidaan havaita, että ilmavirtaukset leviävät myös sivuille, mutta lähempänä rakenteen ulkopintaa ilmavirtaukset kerääntyvät kohti tuulensuojalevyssä olevaa reikää.

Toinen vastaava malli (taulukko 6.8) tehtiin asettamalla reikiä vaakasuuntaiseksi etäisyydeksi toisistaan 200 mm. Tulosten vertailtavuuden vuoksi muut muuttujat pidettiin samoina. Mineralivillan ilmanläpäisevyys mallissa on siis $120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$ ja reikiä leveydet 3 mm. Reikiä epäkeskeisyyden ollessa 200 mm oli suurimmat virtausnopeudet 51,5 mm/s. Ero alkuperäiseen tilanteeseen

seen, jossa reiät olivat kohtisuorassa toisiaan, on noin 11 %. Muutos edelliseen malliin, jossa reikien epäkeskeisyys oli 100 mm, on noin 8 %.

Taulukko 6.8. 2D Termorankaseinämalli, jossa viivamaiset reiät ovat epäkeskeisesti 200 mm.

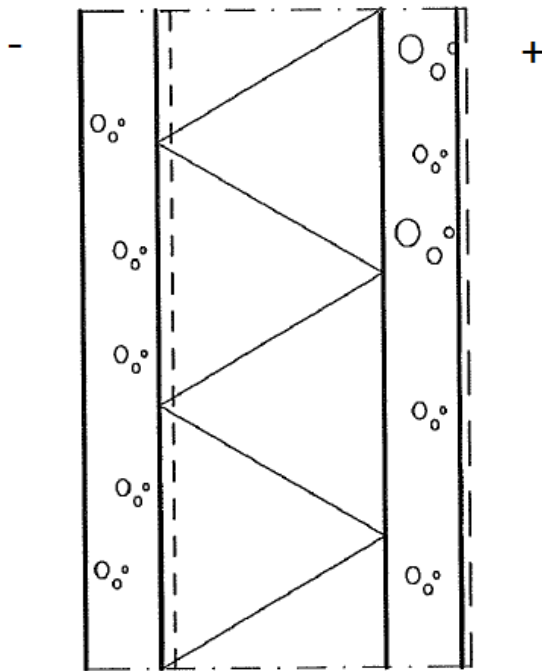
Parametri	Arvo
Reikien leveydet	3 mm sisäverhouslevyn, polyeteenikalvon ja tuulensuojalevyn kohdalla. Mineraalivilla ehjä.
Paine-ero	3 Pa ylipaine.
Mineraalivillan ilmanläpäisevyys	$120 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{msPa}$, (Isover KL37, Parox eXtra)
Reikien epäkeskeisyys	200 mm reiän keskeltä keskelle.

Tuloksista voidaan havaita, että reikien epäkeskeisyys ei vaikuta oleellisesti ilman virtausnopeuksiin. Rakennusvaipan ollessa ylipaineinen voi tällaisten viivamaisten ilmapuotokohtien läpi kulkeutua huomattavia määriä kosteutta rakenteen läpi. Esimerkkinä tapaus, jossa samassa linjassa olevat metrin pituiset 3 mm levyiset viivamaiset reiät ovat sisäverhouslevyssä, polyeteenikalvossa sekä tuulensuojalevyssä. Mineraalivillana Isover KL-37 tai Paroc eXtra, joka menee ehjänä läpi rakenteen. Rakennusvaippa on 3 Pa ylipaineinen ja sisätilan suhteellinen kosteus on 40 % ja sisätilan lämpötila 21 astetta. Tällaisessa esimerkissä reiän läpi virtaavan kosteuden määrä yhdessä kuukaudessa on lähes 1,5 kg. Osa kosteudesta kerääntyy mineraalivillaan ja voi tiivistyä siellä vedeksi. Tilanne on selvä riskitekijä rakenteelle.

6.2 Betonielementtiseinämallit

Kevyen termorankaseinän rinnalle toiseksi seinärakenteeksi valittiin betonielementtiseinä. Mallinnuksessa keskityttiin tutkimaan ilma- ja lämpövirtauksia ilmapuodollisissa rakenteissa. Betonielementtirakenteiset seinät ovat Suomessa

hyvin suosittuja kerrostalojen seinärakenteita. Kuvassa 6.13 näkyy leikkauspiirustus seinärakenteesta.



Kuva 6.13 Betonielementtiseinän rakennemalli

Seinärakenteen rakennekerrokset sisältäpäin lukien ovat seuraavat:

- pintamateriaali ja –käsittely huoneselityksen mukaan
- teräsbetoni rakennepiirustusten mukaan, 80 mm
- ristiin uritettu urasuojattu mineraalivilla: $\lambda_d = 0,036 \text{ W/mK}$, 240 mm (160+80 mm ulompi ristiin uritettu)
- teräsbetoni rakennepiirustusten mukaan, 70 mm
- pintamateriaali ja –käsittely rakennusselityksen ja elementtisuunnitelman mukaan.

Rakenteen lämmönläpäisykerroin on $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$, jolloin se täyttää rakennusmääräyskokoelman velvoittaman tämän hetkisen U-arvo vaatimuksen $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Betonielementtiseinän mallinnuksessa rakennemallista jätettiin huomioimatta mineraalivillan tuuletusurat, teräsbetonissa olevat raudoitukset sekä pintamateriaalit rakenteen ulko- ja sisäpinnoissa. Rakennemallin täysin identtinen mallin-

taminen Comsol Multiphysics'llä olisi lisännyt työmäärää ja hankaloittanut mallin toimimista huomattavasti.

6.2.1 Viivamaiset reiät

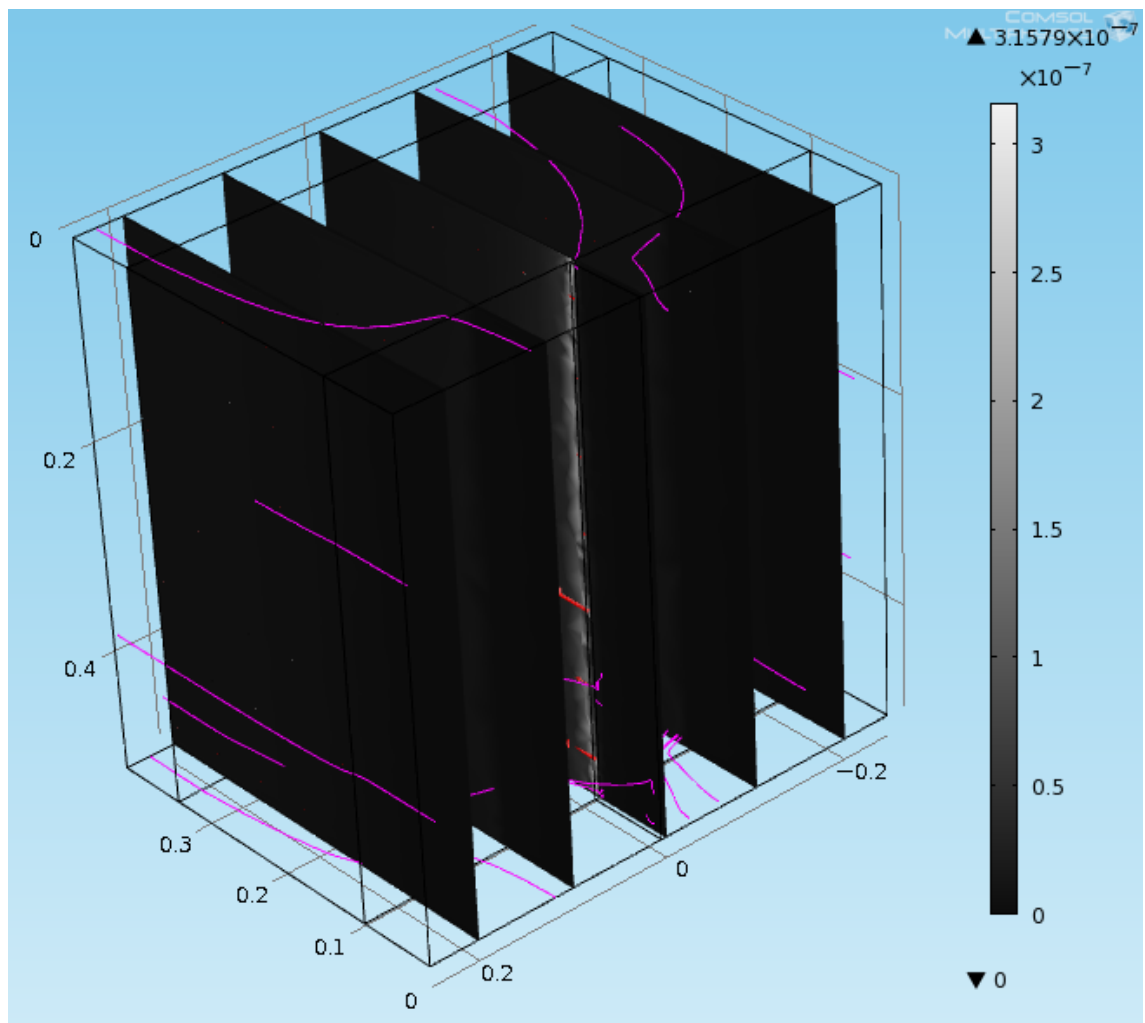
Ohuet viivamaiset reiät ovat tyypillisiä ilmavuototyypppejä betonielementtiseinissä. Viivamaisilla rei'illä tarkoitetaan reikiä, jotka ovat muodoltaan hyvin ohuita, mutta pituussuunnassa ne voivat olla yli metrin pituisia. Yleensä viivamaisia reikiä esiintyy betonielementtiseinien pysty- ja alasaumoissa sekä ikkuna- ja oviaukkojen liitoskohdissa.

Osa simuloiduista malleista tehtiin 2D:nä ja osa 3D:nä. 3D-ulottuvuus lisää työmäärää mallia rakennettaessa ja tekee mallista 2D:tä raskaamman. Toisaalta 3D -malli on havainnollisempi katsojan näkökulmasta. Kaikki betoelementtiseinämallit mallinnettiin jatkuvuustilan tarkasteluina, jolloin säävaihteluita ei ole huomioitu.

Kuvassa 6.14 näkyy ilmavirtaukset 3D-ulottuvuudessa betonielementtiseinässä, jossa on viivamainen reikä ainoastaan seinän sisäkuoressa. Simuloidun mallin (taulukko 6.9) viivamaisen reiän leveys on 5 mm ja syvyys 80 mm, eli sisäkuoren paksuuden verran. Paine-ero rakennuksen ulkovaipan yli on 3 Pa.

Taulukko 6.9. Betonielementtiseinämalli, jossa on viivamainen reikä sisäkuoressa.

Parametri	Arvo
Viivamaisen reiän leveys	5 mm sisäkuoren kohdalla. Muualta rakenne on ehjä.
Viivamaisen reiän syvyys	80 mm
Paine-ero	3 Pa ylipaine.



Kuva 6.14 Comsol Multiphysics -betonielementtiseinämallin virtauskenttä (m/s) paineeron ollessa 3 Pa.

Suurimmat virtausnopeudet kuvan 6.14 rakenteessa ovat noin 0,000315 mm/s viivamaisen reiän ja mineraalivillan rajapinnassa. Aniilinpunaiset virtaviivat kuvaavat ilmavirtauksien leviämistä rakenteessa. Virtaviivojen perusteella osa ilmavirtauksista leviää sivuttaissuunnassa mineraalivillan kohdalla, mutta tultaessa betonielementtiseinän ulkokuoren lähelle, pyrkivät ilmavirtaukset suoraan ulospäin. Tuloksista voidaan päätellä, että viivamaisen reiän ollessa ainoastaan sisäkuoressa, ovat ilmavirtaukset rakenteen läpi käytännössä olemattomia. On kuitenkin huomioitava, että tässä työssä missään betonielementtiseinämallissa ei ole huomioitu mineraalivillan tuuletusuria.

Seuraavassa simuloitussa 2D -betonielementtiseinämallissa (taulukko 6.10) viivamainen reikä menee läpi koko rakenteen. Viivamaisen reiän leveys on 2

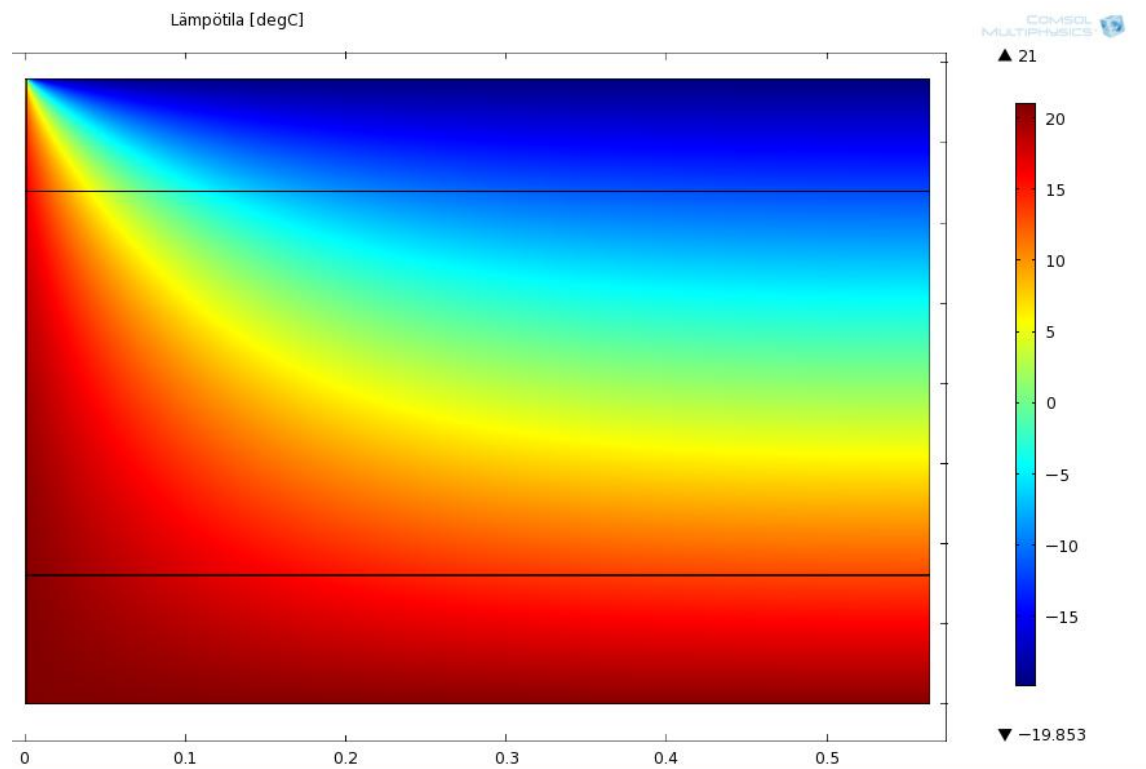
mm ja paine-ero rakenteen yli 3 Pa. Ulkolämpötila on -20 °C ja sisälämpötila + 21 °C, jotka pysyvät molemmat vakioina.

Taulukko 6.10. Betonielementtiseinämalli, jossa on viivamainen reikä läpi koko rakenteen.

Parametri	Arvo
Viivamaisen reiän leveys	2 mm läpi koko rakenteen.
Viivamaisen reiän syvyys	390 mm
Paine-ero	3 Pa ylipaine.
Ulkolämpötila	Vakio - 20 °C
Sisälämpötila	Vakio +21 °C
Sisätilan suhteellinen kosteus	Vakio 40 %

Suurimmat virtausnopeudet ovat reiän keskellä koko matkalla noin 219,2 mm/s. Tunnin aikana ilmaa virtaa metrin pituisen viivamaisen reiän läpi 0,49 m³. Paine-eron pysyessä vakiona on vuorokaudessa virtaavan ilman määrä 11,70 m³. Sisätilan lämpötilan ollessa + 21 °C ja sisätilan suhteellisen kosteuden 40 % on reiän läpi virtaava kosteus määrä vuorokauden aikana noin 85,61 g. Tällainen kosteus määrä on selvä riskitekijä seinärakenteelle.

Seinän halkileikkauksen lämpötilajaukauma jatkuvuustilassa on esitetty kuvassa 6.15. Lämpötilajakauman vasemmassa reunassa on heikosti nähtävillä puolet viivamaisesta reiästä. Kuvasta 6.15 voidaan havaita selvästi, miten sisällä vaikuttava 3 Pa:n ylipaine vaikuttaa seinän lämpötilajaukaumaan. Viivamaisen reiän läpi virtaava lämmin ilma lämmittää seinärakennetta huomattavasti.



Kuva 6.15 Comsol Multiphysics -betonielementtiseinämallin lämpötilajaukauma jatkuvuustilassa.

Seinän läpi virtaava lämpövirta on $61,31 \text{ W/m}^2$ olettaen, että yhden neliön alueella on yksi metrin pituinen viivamainen reikä. Vertailumalliksi luodun ehjän vastaavan seinän läpi virtaava lämpövirta on $5,31 \text{ W/m}^2$. Simuloinnin perusteella tällainen viivamainen reikä lähes 12-kertaistaa läpi virtaavan lämpövirran. Reiällisen seinän U-arvo on $1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$, kun taas vastaavan ehjän seinän U-arvo on $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$. On huomioitava, että ehjän seinän simuloitu U-arvo on parempi kuin aiemmin ilmoitettu $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$. Ero johtuu siitä, että simuloinnissa ei ole huomioitu ansaiden eikä mineraalivillan urien vaikutusta rakenteen U-arvoon.

Viivamaiset reiät ovat selvästi pahempia riskitekijöitä seinärakenteelle kuin pistemäiset reiät. Tämän työn viivamaisten reikien pinta-alat ovat huomattavasti suurempia kuin pistemäisten reikien pinta-alat. Tästä johtuen viivamaisten reikien läpi virtaavat lämpö- ja kosteusmäärät olivat huomattavasti pistemäisiä reikiä suurempia.

7 YHTEENVETO JA PÄÄTELMÄT

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia erityyppisten ilmapuotojen vaikutuksia vaipparakenteen lämpö- ja kosteusolosuhteisiin. Tutkimukset oli tehtävä aiheeseen soveltuvalla mallinnus- ja simulointiohjelmalla. Työn aihetta ja eri mallinnus- ja simulointiohjelmistoja tutkittuani päädyin Comsol Multiphysics -ohjelmistoon, koska se tarjosi parhaat lähtökohdat mallinnuksen onnistumiselle. Tutkittaviksi seinä rakenteiksi valittiin kevyt termorankaseinä sekä betonielementtiseinä. Termorankaseinissä tutkittiin pistemäisiä sekä viivamaisia ilmapuotoja. Betonielementtiseinissä puolestaan tutkittiin ainoastaan viivamaisia ilmapuototapauksia. Ilmapuotomalleja luotiin useita kymmeniä, joista toimimaan saadut, tärkeimmät ja oleelliset mallit on esitelty tässä työssä.

Haastavinta ja aikaa vievintä Comsol Multiphysics -mallien luomisessa oli saada kosteusosio toimimaan oikealla tavalla. Toinen haastava ja aikaa vievä prosessi oli tehdä mallista ajasta riippuvainen. Pelkästään kuukauden lämpötilojen ja suhteellisten kosteuksien arvojen tuominen malliin teki siitä niin raskaan, että normaalin pöytäkoneen muisti oli äärirajoilla. Tästä syystä ajasta riippuvia ja kosteusosion sisältäviä malleja ehdittiin tehdä vain muutamia. Työn haastavuudesta kertoo myös se, että Suomessa ei ole tietävästi tehty aiemmin ilmapuodoista toimivia simulaatioita, joissa olisi huomioitu kosteusosio faasimuutokset huomioiden sekä ajasta riippuvuus.

Kosteusosiossa haastavinta oli se, että suurin osa muuttujista, vakioista sekä yhtälöistä oli itse luotava ohjelman sisälle. Kosteusosio luotiin ohjelmiston lisämoduuleissa olevaa Solute Transport -fysiikkaa hyväksi käyttäen. Tutkimuksesta teki haastavan myös se, että itselläni ei ollut aiempaa kokemusta Comsol Multiphysics -ohjelmiston käytöstä. Comsol Multiphysics on hyvin laaja numeerisen matematiikan ohjelmisto, joten jo pelkkä ohjelmiston alkeiden opettelu oli hyvin aikaavievää.

Comsol Multiphysics -mallinnusten lisäksi opinnäytetyöhön kuului ilmapuotoihin liittyvä teoriaosio. Toisessa luvussa käsiteltiin ilmapuotoihin liittyviä määryksiä ja vaatimuksia. Luvussa tuli esille muun muassa rakennusten ilmatiiviys vaati-

musten kiristyminen. Ympäristöministeriön 28.9.2010 julkaisemassa luonnoksessa määrätään, että ilmanpitävyys on osoitettava mittaamalla. Määräyksen astuessa voimaan ilmatiiviiseen rakentamiseen panostettaneen entistä enemmän. Kolmannessa luvussa esitettiin rakennuksen ulkovaipan yleisimmät ilmapuotokohdat. Tarkasteltavina seinärakenteina oli kevytrakenteiset ulkoseinät sekä betonielementtiseinät. Betonielementtiseinien riskialttuimmat ilmapuotokohdat ovat seinien pysty- ja alasaumat, ikkuna- ja oviaukkojen liitoskohdat sekä läpiviennit. Kevytrakenteisissa ulkoseinissä ilmapuotoja aiheuttaa puolestaan rikkoutunut ilmansulkukerros. Ilmatiiveys voi myös heiketä ajan myötä joutuesaan erilaisiin rasituksiin. Rasituksia voivat aiheuttaa esimerkiksi kosteuden ja lämpötilan muutokset sekä rakenteiden mahdolliset liikkeet.

Yleisimpien ilmapuotokohtien jälkeen käsiteltiin rakennuksen painesuhteita. Tämän työn kaikissa ilmapuotomalleissa käytettiin painesuhteena 3 Pa:n ylipainetta. Tämä tarkoittaa sitä, että ilma pyrkii virtaamaan rakennuksen sisältä ulospäin. Tutkimuksissa käytetty ylipaineen suuruus päätettiin eri rakennusten tutkittujen painesuhteiden perusteella, joka oli yksi tämän luvun aiheista. Lopuksi teoriaosioon kuului vielä erillinen luku ilmapuotojen mallintamisprosessista Comsol Multiphysics -ohjelmistolla.

Comsol Oy tarjoaa ohjelmistoja monifysikaalisien ongelmien mallintamiseen. Comsol on elementtimenetelmään (Finite Element Method) perustuva osittais-differentiaaliyhtälöiden (PDE) numeeriseen ratkaisemiseen tarkoitettu ohjelmisto. Yleisesti mallinnusprosessi koostuu geometrian luomisesta, elementtiverkon tekemisestä, käytettävien moduulien lisäämisestä, ratkaisemisesta ja tulosten visualisoinnista. Ilmapuotojen mallinnuksessa käytettiin tässä työssä seuraavia moduuleja: Heat transfer Module, Earth Science Module ja Chemical Engineering Module. Esimerkiksi Heat Transfer moduulia käytettiin lämpövirtojen simulointiin seinärakenteessa. Simulointia voi tehdä muun muassa 2D:nä, 3D:nä ja 1D:nä. Tämän työn mallit tehtiin 2D:nä, 3D:nä sekä 2D - aksiaalisymmetrisinä.

Opinnäytetyössä tehtyjen mallien avulla pystyttiin arvioimaan erilaisten ilmapuotojen läpi kulkeutuvia ilma-, kosteus- ja lämpövirtoja. Monimutkaisimmat mallit ottivat huomioon paine-eroista johtuvat ilmapuotaukset, ilmapuotauksien

mukana kulkeutuvat kosteusmäärät, faasimuutokset sekä lämpövirrat. Näiden muuttujien lisäksi osa malleista tehtiin ajasta riippuvaisiksi. Ajasta riippuviin malleihin syötettiin esimerkiksi koko marraskuun lämpötila ja kosteustiedot tunnin välein.

Monimutkaisten mallien lisäksi tehtiin myös hyvin yksinkertaistettuja malleja. Termorankaseinä tapauksessa (taulukko 6.1, s.37) oli naulan tekemä reikä sisäverhouslevyssä ja ilmansulkuna toimivassa polyeteenikalvossa. Yleisenä oletuksena tapaukselle voisi olla, että seinässä on selvä ilmavuoto. Simulointien perusteella tällaisen reiän läpi ei kuitenkaan kulje ilmaa lähes lainkaan. Tässä tapauksessa tuulensuojalevyn pieni ilmanläpäisevyys esti ilmaa virtaamasta seinärakenteen läpi. Samasta simuloinnista pystyi myös tekemään mielenkiintoisia päätelmiä tuulensuojalevyn ilmanpitävyyteen liittyen. Arvosteltaessa eri tuulensuojatuotteita ilmavuodon suuruuden kannalta parhaaksi simuloiduksi tuulensuojatuotteeksi nousi normaali tuulensuoja kipsilevy. Suurimmat virtausnopeudet normaalilla tuulensuoja kipsilevyllä mallissa olivat noin 2 mm/s, kun taas puolestaan säänkestävällä Gyproc Glasroc GHU:lla suurimmat virtausnopeudet nousivat arvoon 26 mm/s eli noin 13-kertaisiksi.

Yhdessä termorankaseinämallissa (taulukko 6.2, s.40) oli pistemäinen reikä läpi koko rakenteen. Vaikka tapaus on todellisuudessa harvinaisempi, pystyttiin simuloinnin avulla arvioimaan yksittäisen reiän vaikutusta rakenteen lämpötalouteen ja kosteusrasitukseen. Simuloinnin perusteella halkaisijaltaan 2-3 mm:n kokoinen pistemäinen reikä nosti rakenteen U-arvoa noin 18 %. Tulos tarkoittaa sitä, että jos jokaisella neliöllä olisi tämän tyyppinen reikä, nousisi rakennusvaipan energiankulutus noin 18 %. Reikien vaikutusta rakennusvaipan lämpötalouteen ei siis voi missään tapauksessa vähätellä. Samasta mallista tutkittiin myös kosteuden siirtymistä ja kertymistä rakenteeseen marraskuun tarkasteluajalta. Ilman kosteuden ollessa materiaalissa yli 80 %, mikä tahansa materiaali voi homehtua. (Sisäilmayhdistys 2.) Simuloidut tulokset osoittivat, että kosteus alkoi kerääntymään tuulensuojalevyn sisäpintaan. Suurimmat suhteellisen kosteuden pitoisuudet tuulensuojalevyn sisäpinnassa olivat noin 90 %. Näin suuret kosteuspitoisuudet aiheuttavat selvän homeriskin rakenteelle.

Suuremman pinta-alan takia viivamaiset reiät olivat selvästi pahempia riskitekijöitä seinärakenteelle kuin pistemäiset reiät. Erot tulivat esille esimerkiksi betonielementtiseinämällissä (taulukko 6.10, s.60), jossa oli 2 mm kokoinen viivamainen reikä läpi koko rakenteen. Ehjän seinän U-arvo on $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$, kun taas vastaavan reiällisen seinän U-arvo oli $1,50 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jos jokaisella neliöllä olisi tämän tapauksen mukainen metrin pituinen viivamainen reikä, nousisi rakennusvaipan energiankulutus noin 1050 %. Vastaavasti reiän läpi virtaavat kosteusmäärät sisätilan lämpötilalla $+ 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ja sisätilan suhteellisen kosteuden arvolla 40 % olivat noin 85 g/vrk. Näin suuret kosteusmäärät voivat olla hyvin kohtalokkaita seinärakenteelle.

Termorankaseinissä tutkittiin myös tapausta, jossa reiät olivat sisäverhouslevyssä, polyeteenikalvossa ja tuulensuojalevyssä. Simulaatiossa havaittiin (taulukko 6.4, s. 49), että viivamaisen reiän läpi virtaavat kosteusmäärät olivat hyvin riippuvaisia käytettävän mineraalivillan ilmanläpäisevyydestä. Taulukon 6.4 mukaisessa mallissa reiän läpi virtaavat kosteusmäärät Isover KL-32 mineraalivillalla olivat noin 21 g/vrk. Vastaavasti halvemmalla Isoverin tuotteella KL-37 olivat kosteusmäärät noin 47,1 g/vrk. Kun asiakas ostaa lämmöneristävyydeltään parempaa mineraalivillaa, saa hän sivussa muitakin hyödyllisiä materiaaliominaisuuksia. Paremman ilmanläpäisevyyden ansiosta, mineraalivilla päästää ilmavuototapauksissa vähemmän kosteutta rakenteen läpi. Taulukosta 6.6 (s. 51) voi katsoa ja vertailla seinärakenteen läpi virtaavia kosteusmääriä myös muilla mineraalivilla tuotteilla.

Valittuani opinnäytetyön aiheeksi ilmavuotojen mallintamisen tiesin, että edessäni olisi haastava projekti. Ensimmäinen tehtävä oli löytää ilmavuotojen simuloimiseen soveltuva ohjelmisto. Löydettyäni Comsol Multiphysics -ohjelmiston ja sen käyttöä tarkasteltuani huomasin, miten haastava työ edessä tulisi olemaan. Sain kuitenkin onnekseni Finnmap Consultingin kustantaman Comsol Oy:n antaman henkilökohtaisen koulutuksen ohjelmiston käyttöä varten. Ohjelmiston haastavuuden lisäksi suuri haaste oli oppia tuntemaan ilmavuotoihin liittyvä teoria- ja rakenteellinen osaaminen, joka on hyvin laaja ja monimutkainen.

Opinnäytetyön tekeminen oli hyvin opettavainen kokemus monella tapaa. Työn ohessa opin Comsol Multiphysics -ohjelmiston käyttöä, joka on selvää erikois-

osaamista rakennusosalalla. Tutuiksi tuli myös rakennusfysiikan eri osa-alueet, kuten lämmönsiirtyminen, virtauslaskenta ja faasimuutokset. Simuloinnin haastavuuden takia opinnäytetyö vaati pitkäjänteisyyttä ja oli hyvin pitkälinen prosessi.

KUVAT

Kuva 4.1 Lämpötilaeroista aiheutuva tasatiiviseen rakennukseen kohdistuva painejakauma, s.15

Kuva 4.2 Ilmanvaihtojärjestelmien periaateratkaisut, s.16

Kuva 4.3 Tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutus rakennuksen painesuhteisiin, s.18

Kuva 4.4 Kaikkien tutkimuskohteiden (176 kpl) sisäilman painesuhteet (Pa) ulkoilmaan nähden 685 mittauksessa, s.19

Kuva 5.1 Comsol Multiphysics:llä tehty 3D mallin geometria betonielementtiseinästä, jossa on sisäkuoressa viivamainen reikä, s.22

Kuva 5.2 Comsol Multiphysics:llä tehty betonielementtiseinän elementtiverkko, s.23

Kuva 5.3 Termorankaseinämallin Free and Porous Media Flow-osio, s.26

Kuva 5.4 Termorankaseinämallin Graphics ikkuna, jossa geometria näkyvissä, kun valittuna on Free and Porous Media Flow. Malli on aksiaali- eli pyörähdys-symmetrinen, jonka takia mallia tarkastellaan Comsol Multiphysicsissä puolikkaana. Pyörähdyssymmetrinen mallista tulee, kun Model Builder osioon lisätään Axial Symmetry symmetriaehto, s.27

Kuva 5.5 Comsol Multiphysics:n Model Builder osiosta valittu Ulkolämpötilan (T_{out}) funktio, s.29

Kuva 5.6 Comsol Multiphysics:n Model Builder-osion Heat Transfer in Porous Media. Valittuna oikealla näkyy Porous Matrix mineraalivillan asetukset, s.30

Kuva 5.7 Comsol Multiphysics:n Materials-osio. Oikealla näkyy valittuna olevan mineraalivillan materiaaliominaisuudet, s.30

Kuva 5.8 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin sisälle syötetyt yleiset vesihöyrymuuttujat, s.31

Kuva 5.9 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin sisälle syötetyt muut va-
kiot, s.32

Kuva 5.10 Comsol Multiphysics:n Model Builder-osion Solute Transport-Vesihöyry. Valittuna oikealla näkyy Solute Transport-Vesihöyry kohdan pääasetukset, s.33

Kuva 5.11 Comsol Multiphysics:n Model Builder-osion Solute Transport-Vesi. Valittuna oikealla näkyy Solute Transport_Vesi kohdan pääasetukset, s.34

Kuva 6.1 Termorankaseinän rakennemalli, s.36

Kuva 6.2 Ilmavirtaukset (m/s) seinärakenteessa, jossa on neljän tuuman naulan tekemä reikä. Kuvassa näkyvä rakenne on pyörähdysymmetrisen mallin puoli-
kas, s.38

Kuva 6.3 Ilmavirtaukset (m/s) neljän tuuman naulan tekemän reiän alueella,
s.39

Kuva 6.4 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin virtauskenttä (m/s) paine-
eron ollessa 3 Pa, s.42

Kuva 6.5 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin virtauskentästä otettu
tarkennos suurimpien virtausnopeusten alueelta, s.42

Kuva 6.6 Comsol Multiphysics termorankaseinämallin lämpötilajakauma jatku-
vuustilassa ulkolämpötilalla +2,9 °C, s.43

Kuva 6.7 Comsol Multiphysics:llä tehdyn vertailumallin lämpötilajakauma ehjäs-
tä termorankaseinästä, jossa sisälämpötila +20 °C ja ulkolämpötila -20 °C, s.44

Kuva 6.8 Comsol Multiphysics:llä tehdyn termorankaseinämallin suhteellisen
kosteuden jakauma rakenteessa marraskuun lopusta, s.45

Kuva 6.9 Kipsilevyn sorptiokäyrä (käyrässä on mukana hygroskooppinen sekä
kapillaarinen alue), s.47

Kuva 6.10 Virtausnopeudet (m/s) sisäverhouslevyn reiän kohdalla, s.50

Kuva 6.11 Comsolissa tehty geometria mallista, jossa viivamaiset reiät epäkes-
keisesti. Kuvassa ilmenevät r1,r2,r3 jne ovat ohjelman itse tekemiä selventäviä
numerointeja geometriasta, s.54

Kuva 6.12 Ilmavirtaukset termorankaseinässä viivamaisten reikien ollessa epä-
keskeisesti 100 mm, s.55

Kuva 6.13 Betonielementtiseinän rakennemalli, s.57

Kuva 6.14 Comsol Multiphysics betonielementtiseinämallin virtauskenttä (m/s)
paine-eron ollessa 3 Pa, s.59

Kuva 6.15 Comsol Multiphysics betonielementtiseinämallin lämpötilajakauma
jatkuvuustilassa, s.61

TAULUKOT

Taulukko 4.1 Tavoitteelliset paine-erot ilmanvaihtotavasta riippuen, s.14

Taulukko 4.2. Paine-eromittausten kohdekohtaiset keskimääräiset tulokset (Pa) ulkoilmaan nähden rakennustyypeittäin, ilmanvaihtotavoittain ja eri kerroksissa. Kerroksittaisissa tuloksissa on kyseessä ko. kohteen ko. kerroksen keskiarvo, s.20

Taulukko 6.1. Neljän tuuman naulan tekemä reikä, s.38

Taulukko 6.2. Läpi menevä pistemäinen reikä termorankaseinässä, s.41

Taulukko 6.3. Termorankaseinän tuulensuojalevyn simuloidut vesipitoisuudet marraskuussa eri ajanhetkinä, s.46

Taulukko 6.4. Termorankaseinä, jossa on viivamainen reikä, s.49

Taulukko 6.5 Reiän läpi virtaavan ilman virtausnopeudet (m/s) eri mineraalivillojen ilmanläpäisevyyksillä, s.51

Taulukko 6.6. Reiän läpi virtaavan ilman määrät (l/h) metrin pituisessa viivamaisessa reiässä sekä reiän läpi virtaavan kosteuden määrät (g/vrk) metrin pituisessa viivamaisessa reiässä eri mineraalivillojen ilmanläpäisevyyksillä, s.52

Taulukko 6.7. 2D Termorankaseinämalli, jossa viivamaiset reiät ovat epäkeskeisesti 100 mm, s.54

Taulukko 6.8. 2D Termorankaseinämalli, jossa viivamaiset reiät ovat epäkeskeisesti 200 mm, s.56

Taulukko 6.9. Betonielementtiseinämalli, jossa on viivamainen reikä sisäkuoressa, s.58

Taulukko 6.10. Betonielementtiseinämalli, jossa on viivamainen reikä läpi koko rakenteen, s.60

LÄHTEET

Asumisterveysopas 2009 3. korjattu painos. Sosiaali- ja terveysministeriön Asumisterveysohjeen soveltamisopas. Ympäristö ja terveys-lehti 2009.

Bhaskaran & Collins. Introduction to CFD Basics
<http://courses.cit.cornell.edu/fluent/cfd/intro.pdf> (Luettu 14.5.2011)

CSC. Tieteen tietotekniikan keskus
http://www.csc.fi/tutkimus/alat/numeriiikka/comsolmultiphysics_vuori (Luettu 14.5.2011)

C2 Kosteus. Suomen rakentamismääräyskokoelma 1998. Ympäristöministeriö.

C3 Rakennuksen lämmöneristys. Suomen rakentamismääräyskokoelma 2010. Ympäristöministeriö.

D3 Rakennusten energiatehokkuus. Suomen rakentamismääräyskokoelma 2010. Ympäristöministeriö.

Kosteus- ja homevaurioituneen rakennuksen kuntotutkimus. Ympäristöministeriö 1998. Helsinki: Ympäristöministeriö ja Rakennustieto Oy.

RIL 225-2004. Rakennusosien lämmönläpäisykertoimien laskenta.

Seppänen Kim 2009. Painesuhteet rakennuksen ulkovaipan yli.

Sisäilmayhdistys.
http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/terveelliset_tilat/kosteusvauriot/kosteustekninen_toiminta/ilmavirtaukset_rakennuksessa/#_Asiantuntijatieto (Luettu 14.4.2011)

Sisäilmayhdistys 2.
http://www.sisailmayhdistys.fi/portal/perustietoa/homevaurioiden_ehkaisy_ja_tunnistaminen/ (Luettu 10.8.2011)

Säätiöt
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=15617&lan=fi> (luettu 26.8.2011)

Termoprofiili
<http://www.majatehas.ee/index.php?page=146&> (luettu 30.7.2011)

WUFI
http://www.vtt.fi/service/exp/buildingsurveys/wufi_software.jsp (luettu 15.5.2011)